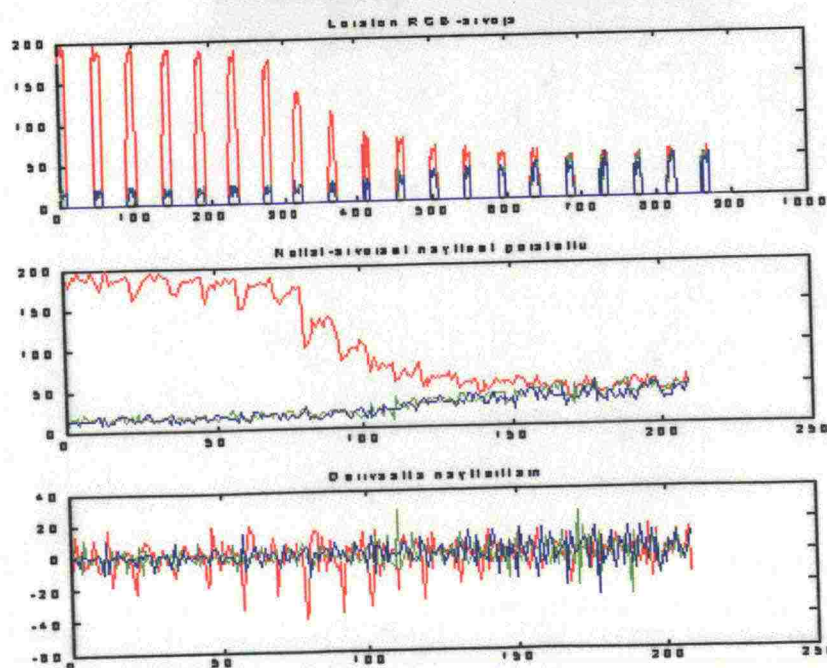
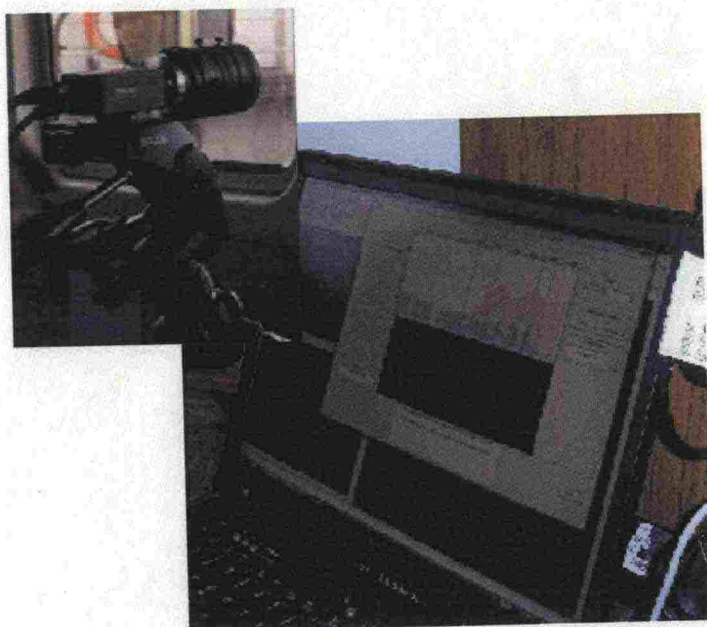


SEKTORILOISTOJEN VÄRIRAJOJEN MÄÄRITTÄMINEN KUVAAN PERUSTUVAN MITTAUKSEN KEINAIN, VAIHE 3



Julkaisija



Merenkululaitos

KUVAILEHTI

04.01.2008

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)

TTY Mittaus- ja informaatiotekniikan laitos

Antti Koponen ja Antti Vehkaoja

Julkaisun laji

Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja

Toimeksiantaja

MKL/Väylänpito/DI Risto Joro

Toimielimen asettamispäivämäärä

15.02.2007

Julkaisun nimi

SEKTORILOISTOJEN VÄRIRAJOJEN MÄÄRITTÄMINEN KUVAAN PERUSTUVAN MITTAUKSEN KEINAIN, VAIHE 3

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli kehittää järjestelmä, jolla loistojen kuvaaminen ja samanaikainen GPS-datan vastaanottaminen tietokoneelle onnistuisi. Tällöin, kun tallennetut kuvakehykset saataisiin synkronoitua GPS-datan kanssa, tiedettäisiin paikka, jossa oltiin kutakin kuvakehystä tallennettaessa. Tavoitteena oli myös kehittää edellisissä projekteissa tehtyä alustavaa kuvankäsittelyalgoritmia.

Väriajan paikka tulisi olla sellaisessa kohdassa, jossa loiston väri ihmissilmän mielestä muuttuu. Ihmisen värinäkö ja eri kohteiden havainnointi tietyn värisenä on monimutkainen prosessi, jonka jäljittely konenäöllä on vaikeaa. Tämä tuo oman vaikeutensa rajan paikan hakemiseen. Rajantunnistusalgoritmin toimintaa selvitetään alaluvussa 6.3. Järjestelmään tehtiin graafinen käyttöliittymä, jolla kuvaaminen ja rajojen tarkastus tehdään. Järjestelmä koostuu kannettavasta tietokoneesta, johon liitettiin GPS-vastaanotin ja konenäkökamera. Työssä käytetystä laitteistosta kerrotaan tarkemmin luvussa 4. Järjestelmä toteutettiin MATLAB-ohjelmistolla kokonaisuudessaan. MATLAB:in suorituskky aiheutti vaikeuksia kuvaustilanteessa. Tätä kuvataan alaluvussa 5.2.2.

Kenttätetit eli sektoriloistojen kuvaaminen kuuluivat osana työhön. Testit olivat hyödyllisiä kuvaamismenetelmien kehittämiseksi ja testidatan saamiseksi rajantunnistusta varten. Kuvausmatkoista kerrotaan luvussa 7.

Luvussa 8 verrataan laskettuja sektorirajanpaikkoja toisiinsa sekä pohditaan järjestelmän jatkokehitysideoita.

Avainsanat (asiasanat)

Sektoriloisto, kuvankäsittelyalgoritmi, GPS-data

Muut tiedot



10483

Sarjan nimi ja numero

**Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja
1/2008**

ISSN

1456-9442

ISBN

Kokonaissivumäärä

2 + 90

Kieli

Hinta

Luottamuksellisuus

Jakaja

Kustantaja

Sisällys

Lyhenteet ja merkinnät	5
1. Johdanto	1
2. Sektoriloisto	3
2.1 Sektoriloistojen tekniikkaa	3
2.2 Sektorivalon ominaisuuksista	7
2.2.1 CIELAB-väriavaruus	9
2.3 Sektorivalon valotunnukset	12
3. Sektorirajojen automaattinen tunnistus	14
3.1 Tarve automaattiselle tunnistukselle	14
3.2 Projektin edelliset vaiheet	15
3.2.1 Esiselvitysprojekti	15
3.2.2 Projektin toinen vaihe	16
3.3 Toteutettavan järjestelmän vaatimukset	17
4. Työssä käytetty laitteisto	17
4.1 GPS-vastaanotin	17
4.1.1 NMEA 0183-standardi	18
4.2 Kamera	20
4.2.1 Objektiivi	21
4.3 PC	22
5. Järjestelmän kuvaus	22
5.1 Käyttöliittymän toiminnot	23
5.1.1 Kameran säädöt	24
5.1.2 Kuvaaminen	24
5.1.3 Värirajojen tunnistus	25
5.1.4 Muut toiminnot	25
5.2 Kameran asetukset ja kuvaus	25
5.2.1 Kameran asetukset	26
5.2.2 Kuvauksen asetukset	27
5.3 GPS-datan käsittely	29
5.3.1 GPS-datan synkronointi	29
5.3.2 Yksikön muuttaminen ja koordinaattien interpolointi	31
6. Kuvankäsittely	32
6.1 Loistopisteen tunnistus	32
6.1.1 Ensimmäisen kuvan käsittely	32
6.1.2 Kuvien esikäsittely	33
6.1.3 Loistopisteen hakeminen peräkkäisistä kuvista	37
6.2 Taustavalon käsittely	40
6.3 Sektorirajojen löytäminen	43

6.3.1 Värivektorien esikäsittely	43
6.3.2 Väriarvojen haku puhtaille sektoreille	44
6.3.3 Näytteiden luokittelu väreihin	47
6.3.4 Rajan määrityksen muuttuminen työn edetessä	48
6.3.5 Värirajan määrittäminen	50
7. Mittausdatan hankinta ja järjestelmän testaus	54
7.1 Alustava testaus Siilinkarin loistolla	54
7.2 Toinen testauskerta Siilinkarilla	54
7.3 Muut testauskerrat Siilinkarilla ja Raumalla	55
7.4 Hangon testi	56
8. Tulosten arviointi	57
8.1 Siilinkarin sektorirajojen laskemisesta	57
8.2 Laskettujen rajojen hajonta	60
8.3 Tulosten virhelähteet	61
8.4 Järjestelmän jatkokehitys	62
9. Yhteenveto	63
Lähdeluettelo	65
Liitteet	66
Liite 1: Käyttöliittymä	66
Liite 2: Tärkeimpien Matlab-funktioiden esittelyt	67

Lyhenteet ja merkinnät

ASCII	American Standard Code for Information Interchange, merkkien koodaustapa
CCD	Charge-Coupled Device, varauskytketty komponentti
CIE	International Commission on Illumination
CIELAB	CIE:n määrittelemä värimalli, L,A ja B komponenttien nimet
CIEXYZ	CIE:n määrittelemä värimalli, X,Y ja Z komponenttien nimet
COM-port	Tietokoneen sarjaportti
CR	Carriage Return, telan palautus
DGPS	Differential Global Positioning System
Euref-Fin	Koordinaattijärjestelmä
GPGGA	Global Positioning System Fix Data, GPS-paketti
GUIDE	Graphical User Interface Design Environment
IALA	International Association of Lighthouse Authorities, alkup. Association Internationale de Signalisation Maritime
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO-luku	International Organisation for Standardization, kennon valoherkkyys
KKJ	Kartastokoordinaattijärjestelmä
LF	Line feed, rivinvaihto
LMS	Least Mean Squares
NMEA	National Marine Electronics Association
PGRMO	Output sentence enable/disable, GPS-paketti
RGB	Red, Green, Blue. Väriavaruuden komponentit
RMS	Root Mean Square
UTC	Universal Coordinated Time, nollameridiaanin aika

Johdanto

Sektoriloisto on navigoinnin turvalaite, joka lähettää valkoista valoa turvallisen väylän suuntaan, vihreätä valoa väylän vasemmalle puolelle ja punaista väylän oikealle puolelle. Sektoriloiston ominaisuuksista kerrotaan enemmän luvussa 2. Suunnat, joihin eriväriset sektorit näkyvät, on tarkastettava loiston huoltojen yhteydessä tai vuosittaisissa tarkastuksissa. Nykyään sektorirajojen paikat tarkastetaan visuaalisesti ajamalla väyläntarkastusaluksella kohtisuoraan sektorirajaa vastaan ja merkitsemällä raja siihen, missä värin havaitaan vaihtuvan. Tällaisessa tarkastuksessa on ongelmana se, että rajan paikka vaihtelee tarkastajasta riippuen, koska loiston väri vaihtuu melko hitaasti ja sektoreiden värit vaihtelevat loistojen välillä. Tämän takia ihmisen subjektiivinen käsitys väreistä ja näöntarkkuus vaikuttavat merkittävästi rajan paikkaan. Rajojen tarkastamisesta ja siihen liittyvistä ongelmista kerrotaan luvussa 3.

Mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksella on tutkittu mahdollisuutta tehdä sektorirajojen paikannus perustuen digitaalikuvaan ja GPS-paikannukseen. Esitutkimuksessa vuonna 2005 [1] kartoitettiin mahdollisuuksia ja ongelmia, joita rajojen kuvaamiseen ja rajojen tunnistamiseen kuvista sisältyi. Seuraavassa vaiheessa loistoja kuvattiin esiselvityksen pohjalta valitulla konenäkökameralla ja kehitettiin kuvankäsittelyalgoritmia rajojen löytämiseksi. Käytössä oli myös käsikäyttöinen GPS-vastaanotin. Projektin edellisistä vaiheista kerrotaan kappaleissa 3.2.1 ja 3.2.2.

Työn tavoitteena oli kehittää järjestelmä, jolla loistojen kuvaaminen ja samanaikainen GPS-datan vastaanottaminen tietokoneelle onnistuisi. Tällöin, kun tallennetut kuvakehykset saataisiin synkronoitua GPS-datan kanssa, tiedettäisiin paikka, jossa oltiin kutakin kuvakehystä tallennettaessa. Tavoitteena oli myös kehittää edellisissä projekteissa tehtyä alustavaa kuvankäsittelyalgoritmia.

Ennen loiston värin tutkimista kuvakehyksistä, on loistovallo löydettävä kuvasta. Erilaiset taustavalot kuvauksissa vaikeuttavat loiston etsimistä kuvista. Kuvauksen aikana kuvaan tulee uusia valonlähteitä, jotka on hylättävä ja oikea loisto löydettävä. Haastavaa loiston etsimisestä peräkkäisissä kuvissa tekee loiston palaminen välähdyksittäin. Kaikki valonlähteet on hylättävä niistä kuvakehyksistä, joissa sektoriloistoa ei näy. Toisaalta loiston syttyessä se on löydettävä taustavalojen joukosta. Sektoriloiston värin vaihtuminen sektorirajalla tekee hahmontunnistuksesta vaikeampaa. Kuvien esikäsittelystä ja loiston etsimisestä kerrotaan kappaleissa 6.1 – 6.2.

Vaikeutena rajan paikkojen määrittämisessä digitaalikuvaan on se, että eri loistojen valojen intensiteetit ja värit vaihtelevat. Loiston palaessa välähdellen sen lähettämän valon intensiteetti ja spektri vaihtelee myös sen syttyessä, sammuaessa ja täydellä teholla palaessa. Loistojen valon intensiteetin vaihtelusta seuraa se, että kameran asetuksia on muutettava eri loistoja kuvattaessa, jolloin kameran asetuksia ei voida pitää kiinteinä. Kameran asetukset vaikuttavat myös merkittävästi valon väriin digitaalikuvissa. Koska loiston väriä ei voida täysin ennustaa, on sen värin luokittelu ja värin muuttumiskohtien etsiminen kuvakehyksistä vaikeampaa. Kuvaamisesta kerrotaan alaluvussa 5.2.

Väriajan paikka tulisi olla sellaisessa kohdassa, jossa loiston väri ihmissilmän mielestä muuttuu. Ihmisen värinäkö ja eri kohteiden havainnointi tietyn värisenä on monimutkainen prosessi, jonka jäljittely konenäöllä on vaikeaa. Tämä tuo oman vaikeutensa rajan paikan hakemiseen. Rajantunnistusalgoritmin toimintaa selvitetään alaluvussa 6.3. Järjestelmään tehtiin graafinen käyttöliittymä, jolla kuvaaminen ja rajojen tarkastus tehdään. Järjestelmä koostuu kannettavasta tietokoneesta, johon liitettiin GPS-vastaanotin ja konenäkökamera. Työssä käytetystä laitteistosta kerrotaan tarkemmin luvussa 4. Järjestelmä toteutettiin MATLAB-ohjelmistolla kokonaisuudessaan. MATLAB:in suorituskkyky aiheutti vaikeuksia kuvaustilanteessa. Tätä kuvataan alaluvussa 5.2.2.

Kenttätetit eli sektoriloistojen kuvaaminen kuuluivat osana työhön. Testit olivat hyödyllisiä kuvaamisen menetelmien kehittämiseksi ja testidatan saamiseksi rajantunnistusta varten. Kuvausmatkoista kerrotaan luvussa 7.

Luvussa 8 verrataan laskettuja sektorirajanpaikkoja toisiinsa sekä pohditaan järjestelmän jatkokehitysideoita.

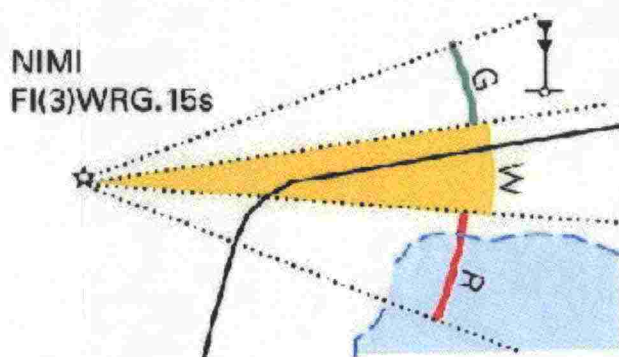
Sektoriloisto

Sektoriloistolla tarkoitetaan vesillä olevaa valonlähdetä, jonka valon värin perusteella alukset tietävät, ovatko ne väylällä vai väylän ulkopuolella. Sektoriloisto on siis navigoinnin apuväline, jonka avulla merellä liikkujat voivat tarkastaa oman sijaintinsa ja kulkusuuntansa turvallisuuden. Sektoriloistot voivat olla majakan yhteydessä tai omassa rakennuksessaan. Sektoriloistot on tarkoitettu käytettäväksi yöaikaan, kun navigointi näkyvien maamerkkien avulla ei ole mahdollista. Loistojen valovoimakkuus on melko pieni, minkä vuoksi ne eivät näy riittävän hyvin päivänvalossa. Sektoreiden rajat on merkitty uusiin paperikarttoihin ja GPS-vastaanottimien kanssa käytettäviin elektronisiin karttoihin, joiden perusteella suurimmaksi osaksi navigoidaan. [2]

Sektoriloisto koostuu kolmesta väristä: valkoisesta, punaisesta ja vihreästä. Valkoista valoa näytetään turvalliselle sektorille eli väylälle, vihreää valonlähteestä katsottuna väylän vasemmalle puolelle ja punaista väylän oikealle puolelle. Punainen ja vihreä sektori merkitsevät karikkoa tai muuten vaarallista kulkusuuntaa. [2]

Sektorien välissä on kapea, yleensä alle 1 asteen levyinen, epävarma alue, jossa vierekkäisten sektorien värit sekoittuvat toisiinsa. Tavallisesti yksi loisto ohjaa useampaa kuin yhtä väylää ja kapeilla kielletyillä sektoreilla voidaan ilmaista myös yksittäisiä kareja tai matalikkoja. [2] Sektoriloisto palaa välähdellen. Loiston välähdysjakso eli valotunnus koostuu tietyin väliajoin toistuvista valopulsseista. Palamisaika vaihtelee useimmiten 0,15-2 sekunnin välillä ja pimennysaika 1-7 sekunnin välillä [3]. Usein loistot voidaan säätää niin, että ne näyttävät jatkuvaa valoa pulssien sijasta [2]. Suomessa on tällä hetkellä 450 sektoriloistoa ja 1917 sektorirajaa. [4]

Kuvassa 1 on esimerkki merikartasta, johon sektoriloiston eri sektorit on merkitty. Valkoinen sektori on merkitty keltaisella värillä ja kirjaimella W.

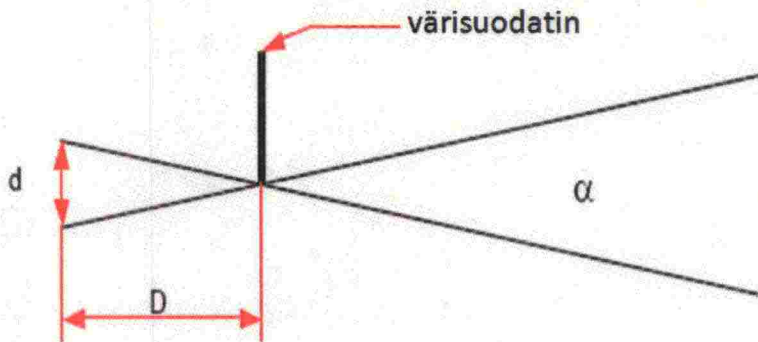


Kuva 1: Sektoriloisto merikartalla [5]

Sektoriloistojen tekniikkaa

Sektoriloiston tuottamiseen käytetään useaa eri tekniikkaa. Alkuperäinen ja nykyäänkin yleisin tapa on käyttää joka suuntaan valaisevaa valkoista hehkulamppua, joko majakkaa tai

omaa sektorirakennusta. Eri sektorit merkitään siten, että lampun ympärille asetetaan värisuodattimia kiellettyjen sektorien suuntaan. Ne suodattavat lampun valkoista valoa niin, että jäljelle jää vihreä tai punainen väri. Värisuodattimet ovat yleensä lasia tai muovia, kuten polykarbonaattia tai akryyliä. Nykyisin suositaan muovivalmisteisia suodattimia, koska niiden valmistaminen tietyn väriseksi on helpompaa [6]. Värisuodattimet pitää asettaa riittävän kauaksi valonlähteestä, jotta sektorirajat ovat tarpeeksi selvät. Myös lampun leveys vaikuttaa sektorirajojen selvyyteen. Mitä suurempi etäisyys valonlähteestä värisuodattimeen ja mitä pienempi on valonlähteen leveys, sitä pienempi on epävarmuusalue. [2] Kuvassa 2 on esitetty epävarmaan kulmaan vaikuttavat tekijät.



Kuva 2: Sektorien väliseen epävarmaan kulmaan vaikuttavat tekijät

Epävarma kulma lasketaan kaavalla:

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{0.5 \cdot d}{D} \right) \approx \frac{d}{D} \cdot 57^\circ, \quad (1)$$

missä D on etäisyys lampusta värisuodattimeen ja d on lampun leveys.

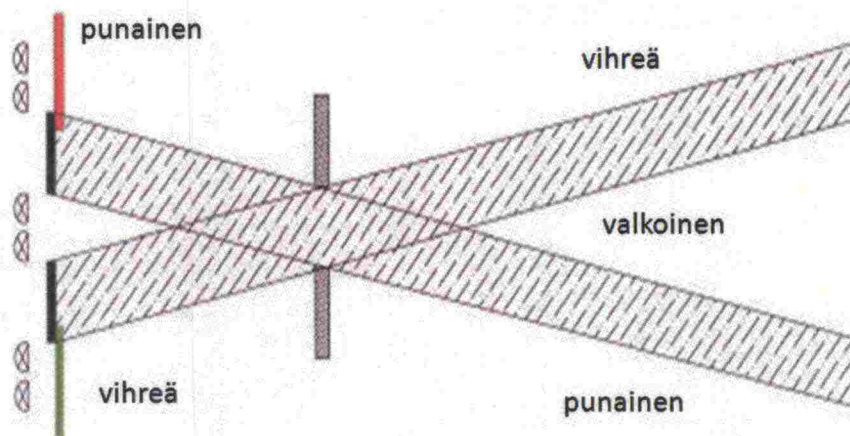
Kuvassa 3 on vasemmalla loisto, jonka värisuodattimet ovat ulkopuolella. Suuremmissa loistorakennuksissa suodattimet voidaan laittaa ikkunoiden sisäpuolelle, missä ne ovat suojassa sään vaikutuksilta, kuten oikean puoleisessa kuvassa on tehty.



Kuva 3: Sektoriloistoja värisuodattimilla

Toinen tapa on käyttää valonlähteitä, joiden lähettämä valo saadaan suunnattua tarkasti. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää linsejä ohjaamaan valoa. Linsejä käyttämällä sektorirajan läheisyydessä oleva epävarma alue on pienempi kuin värisuodattimia käyttämällä. Tyypillinen epävarma sektori on pistemäistä valonlähdettä käyttämällä noin 0,25 astetta ja kohdistetulla valaisimella noin 0,017 astetta [2]. 0,017 astettvastaa vain noin yhden metrin matkaa 3,5 kilometrin etäisyydellä loistosta. Lähteessä mainittu 0,25 astetta on kuitenkin melko optimistinen arvio epävarman sektorin leveydeksi, koska tämän työn lähtökohtana oli se, että rajan paikka saattaa tarkastajasta riippuen vaihdella tarkastusetäisyydellä jopa sata metriä [7]. Kohdistetulla valonlähteellä saadaan aikaan myös kapeampi sektori tarvittaessa.

Toinen loiston kohdistustapa on sen suuntaaminen aukon läpi, jolloin aukon koolla ja sen etäisyydellä loistosta säädetään sektorin leveyttä. Kuvassa 4 on periaatekuva aukon käytöstä, josta nähdään, että yhdellä aukolla voidaan ohjata useita sektoreita. Tällä tekniikalla saadaan tarkat sektorirajat, jos aukko on asetettu riittävän kauaksi loistosta [2].

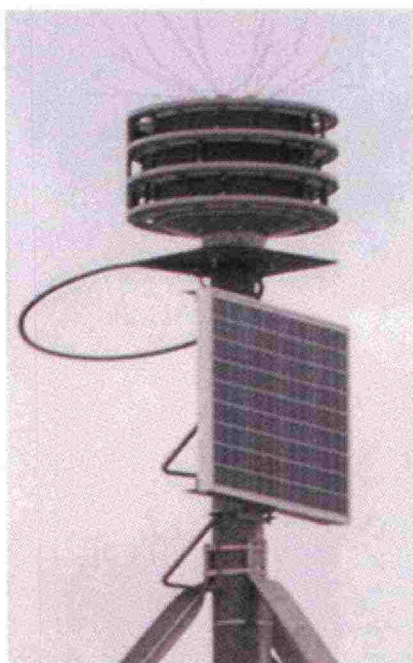


Kuva 4: Loiston kohdistaminen aukolla

LED-valoja voidaan käyttää sektoriloiston tuottamiseen. LED-valoilla on mahdollista tuottaa kapeaspektristä valoa, joten niitä käyttämällä ei tarvita erillisiä värisuodattimia. Valkoisen LED-valon intensiteetti on pienempi kuin värillisten LED-valojen, joten värillisten LED-valojen intensiteettiä on pienennettävä tai on hyväksyttävä intensiteetiltään erilaiset sektoriloistot. [2]

Yksittäisten vaara-alueiden merkitsemiseksi saatetaan tarvita hyvin kapeita sektoreita. Sellaisia saadaan aikaan valonlähteellä, joka on asetettu paraboloidin muotoisen peilin polttopisteeseen. Laser-valolla saadaan hyvin kapeita sektoreita. Laser-valoa voidaan levittää liikkuvan peilin avulla. Laser-valon käyttäminen sektoriloiston tuottamiseen on kuitenkin prototyyppi-asteella. [2]

Suomessa on tällä hetkellä yksi LED-sektoriloisto ja muut on toteutettu perinteisellä värisuodatin-menetelmällä. LED-loisto sijaitsee Hangon edustalla. Loisto on kuvassa 5. Loisto saa virtaa valojen alla olevasta aurinkopaneelistä.



Kuva 5: Hangon LED-loisto

Sektorivalon ominaisuuksista

Värisuodattimia käyttäessä on huomioitava värisuodattimen vaikutus valon intensiteettiin. Valkoisen sektorin valo tavallisella majakan lampulla on noin viisi kertaa suurempaa intensiteetiltään kuin punaisen ja vihreän sektorin. Valkoisen sektorin valon intensiteettiä voidaan pienentää suodattamalla sitä optisella suodattimella, joka säilyttää valon värin, tai värillisen sektorin valon intensiteettiä nostaa käyttämällä vahvistavaa prismaa [2].

Valon spektrin ominaisuudet muuttuvat sen kulkiessa ilmassa, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että samasta lähteestä tuleva valo näyttää eriväriseltä eri etäisyyksien päästä tarkasteltuna. Esimerkiksi valkoinen valo voi näyttää oranssilta ja vihreä valo, jossa on mukana punaista väriä voi näyttää enemmän punaiselta kuin vihreältä pitkän etäisyyden päästä tarkasteltuna. Värin muutokset johtuvat pääosin kolmesta eri seikasta: ilmakehän absorptiosta, Mien sironnasta ja Rayleigh'n sironnasta. Ilmakehän hiilidioksidi- ja vesimolekyylit absorboivat valosta energiaa absorption määrän ollessa riippuvainen valon aallonpituudesta. Mien sironnassa valon kulkutiellä vastaan tulevien hiukkasten koko suhteessa säteilyn aallonpituuteen on merkittävää. Niiden ollessa samaa luokkaa on Mien sironta voimakasta ja kaikki aallonpituudet siroavat yhtä paljon. Sumuisella säällä Mien sironta on hallitsevaa, koska vesimolekyylien määrä ilmassa on suuri. Rayleigh'n sirontaan vaikuttavat pienet hiukkaset, ja sironnan määrä riippuu säteilyn aallonpituudesta. Rayleigh'n sironnan määrä suurenee valon aallonpituuden pienetessä.[2] Sektoriloiston tapauksessa tämä merkitsee sitä, että vihreän sektori valo siroaa enemmän kuin punaisen sektorin.

Havaittuun valon väriin vaikuttaa aina myös ihmissilmän sopeutuminen eri valaistusolosuhteisiin, eli aallonpituudeltaan samanlainen valo näyttää erilaiselta eri valaistuksessa. Ihmisen aivot tekevät saapuvalle kuvainformaatiolle jatkuvasti korjauksia ja suodattavat sitä huomaamattamme. Aivot valitsevat havaitsijan aiempien kokemusten perusteella todennäköisimmän vaihtoehdon silmään saapuvan kohteen ominaisuuksien perusteella ja muodostavat vasta sitten näköhavainnon. [8] Sektoriloistoa havaitessa aivojen suodatusten tulokset tuskin kuitenkaan poikkeavat paljoa todellisuudesta, koska loisto on helposti tulkittava yksivärinen valonlähde. Näiden tekijöiden lisäksi ihmisten subjektiivinen käsitys väreistä ja näöntarkkuus vaihtelevat vaikuttaen myös sektorinrajan paikkaan.

Sektoriloiston värisuodatin saattaa huurtua äkillisten säävaihteluiden seurauksena tai sen pinnalle kertyä lunta tai jäätä, jolloin loiston väri saattaa näyttää valkoiselta myös värillisillä sektoreilla. Tämä vaara on erityisesti vihreillä sektoreilla. Jotkut loistot on asetettu valaisemaan vain tiettyihin suuntiin, mutta niistä saattaa silti näkyä valoa myös niistä suunnista katsottuna, mistä valoa ei pitäisi näkyä. Tällöin valon väri on useimmiten sama kuin lähimmän valaistun sektorin valo. Näitä valoheijastumia esiintyy eniten silloin, kun loisto on huurun tai jään peitossa. [3]

Eriväristen sektorien välillä on aina ns. harmaa tai epävarma alue, jonka väri on yhdistelmä molempien sektorien väreistä. Sektorirajaa ylitettäessä on tärkeää, että rajaa ylittävässä aluksessa huomataan rajan ylitys. Rajan ylitys havaitaan tehokkaimmin, kun harmaa alue on mahdollisimman lyhyt [2].

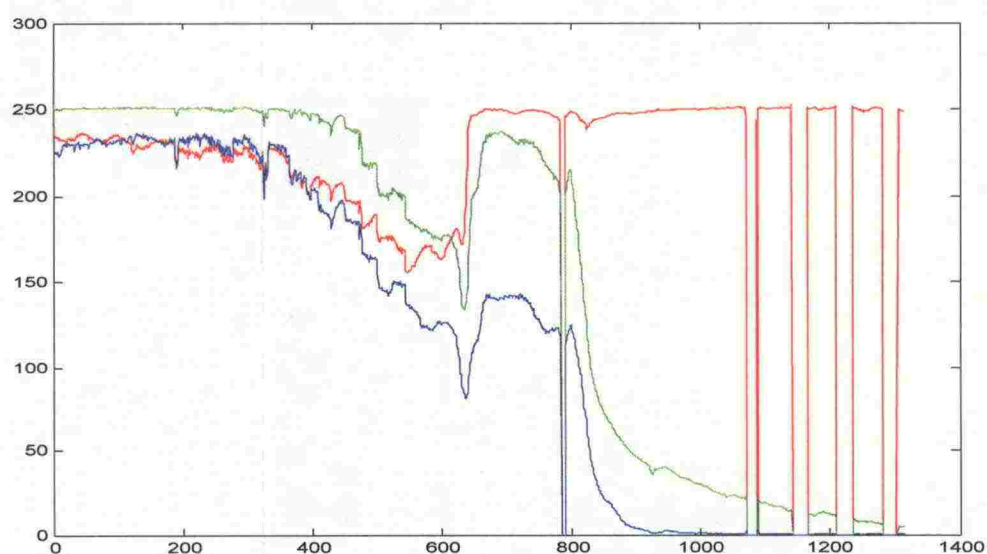
Edellä mainittujen tekijöiden sekä ihmissilmän värien erottelukyvyn takia IALA (International Association of Lighthouse Authorities) suosittelee käytettäväksi ainoastaan valkoista, punaista ja vihreää valoa sektoriloistoina. IALA on määritellyt vaihteluvälit käytetyille sektorivaloille käyttäen CIE:n määrittelemää (International Commission on Illumination) XYZ-väriavaruutta. CIE:n väriavaruuden käyttämistä värirajojen määrittämiseen kuvataan seuraavassa alaluvussa. [2]

Sektorien väreillä on kuitenkin loistojen välillä vaihtelua, koska loistoissa käytetyt värisuodattimet voivat olla erilaisia sekä väriltään että materiaaliltaan. Kuvassa 6 ovat Vaasan

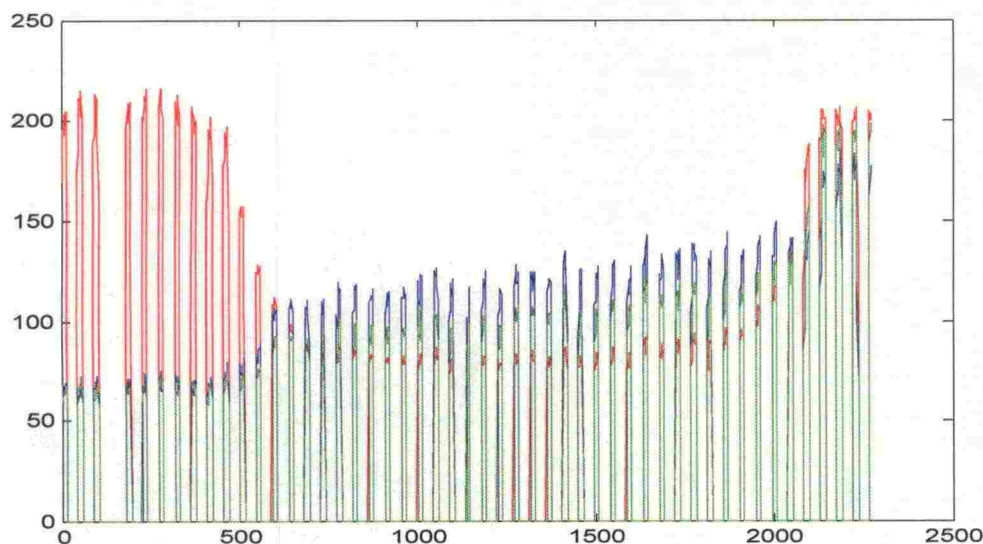
Vaskiluodon ja kuvassa 7 Näsijärven Siilinkarin kuvauksista saadut loistojen RGB-arvot (Red, Green, Blue). Vaasan loisto on kuvattu aiemmin käyttäen Canon EOS D30-digitaalivideokameraa ja Siilinkarin loisto on kuvattu tässä projektissa käytössä olevalla Foculus 432SC-konenäkökameralla.

Kuvassa 6 on siirrytty vihreän sektorin kautta punaiselle sektorille. Kuvassa 7 ovat Näsijärven loiston väriarvot, kun on kuvattu siirtymää punaiselta sektorilta vihreälle ja lopuksi valkoiselle. Vaasan loisto oli asetettu palamaan kiinteästi kuvausten ajaksi. Lopussa loisto oli hetkittäin poissa kuvista, mikä selittää nollakohdat. Kuten kuvista nähdään, ovat loistojen samanväristen sektoreiden värit hyvin erilaisia. Vaasan loiston vihreä sektori on intensiteetiltään hyvin kirkas ja vihreä kanava on voimakkain, kun taas Näsijärven vihreä sektori on himmeä ja sininen kanava on voimakkain. Lähteessä [9] mainitaan vihreän värin näkyvän yleisesti huonosti merellä ja että se saattaa sekoittua siniseen väriin. Myös punaisessa kanavassa näkyy eroja loistojen välillä. Vaasan loiston punainen on melko puhtaasti punainen ja Näsijärven loiston punaisella sektorilla myös sininen ja vihreä kanava saavat melko korkeita arvoja. Erot kameroiden asetuksissa kuvauksissa voivat myös selittää eroja väriarvoissa.

Tämän takia kiinteät säännöt värintunnistuksessa sektorin vaihtumiskohdiksi eivät toimi, vaan tunnistus on tehtävä käyttäen jokaiselle loistolle omia sääntöjä sen sektoreiden värin perusteella.



Kuva 6: Vaasan Vaskiluodon loiston RGB-arvot



Kuva 7: Näsijärven Siilinkarin loiston RGB-arvot

CIELAB-väriavaruus

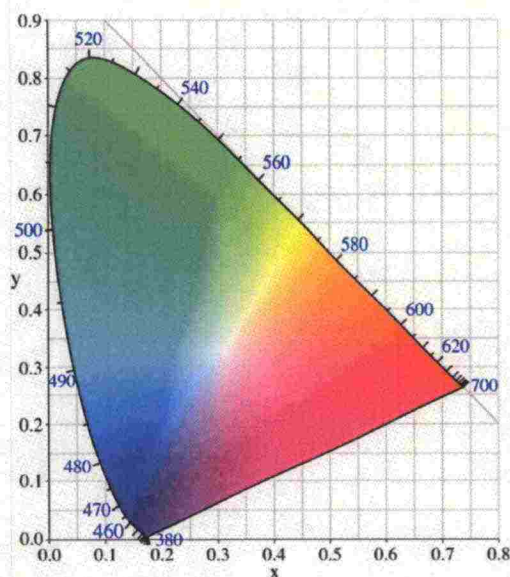
CIELAB-värimalli on johdettu CIEXYZ-väriavaruudesta, jonka X, Y ja Z kuvaavat punaista, vihreää ja sinistä väriä. Näiden värien yhdistelminä on mahdollista tuottaa kaikki mahdolliset näkyvän valon värit. Näistä niin kutsutuista trikromaattisuusarvoista saadaan trikromaattisuuskertoimet seuraavilla kaavoilla:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2)$$

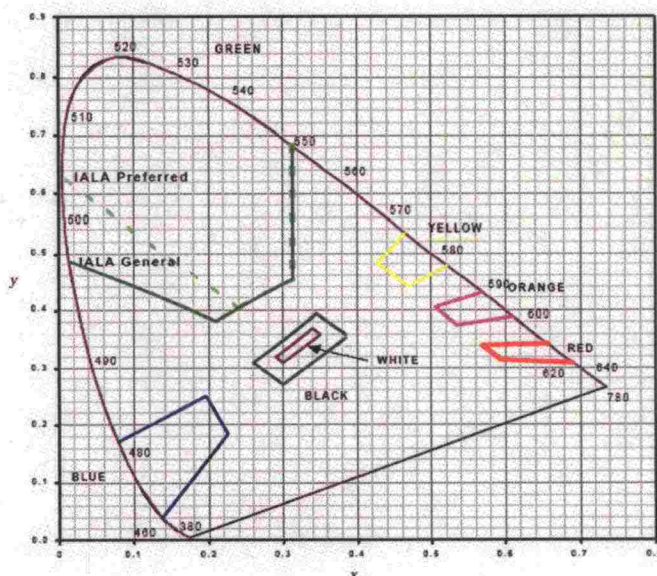
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

CIE:n kromaattisuusdiagrammissa, joka on esitetty kuvassa 8, on käytetty trikromaattisuuskertoimia x ja y koordinaattiakseleina. Kromaattisuudella tarkoitetaan huen ja saturaation yhdistelmää. Hue tarkoittaa värin dominoivaa aallonpituutta, eli havaittua värisävyä ja saturaatio värikylläisyyttä. Värikylläisyydellä tarkoitetaan valkoisen värin osuutta värisävyssä, esimerkiksi jos punaisen värin värikylläisyyttä pienennetään, syntyy vaaleanpunaista. Kuvion reunoilla olevat värit ovat täysin saturoituneita ja keskellä on valkoinen piste, jossa punaisen, vihreän ja sinisen arvot ovat yhtä suuret. Tämä piste on CIE:n standardivalkoinen.[10]



Kuva 8: CIE:n kromaattisuusdiagrammi [11]

Kuvassa 9 ovat IALA:n määrittelemät suositeltavat sektoriloiston värit tässä koordinaatistossa.

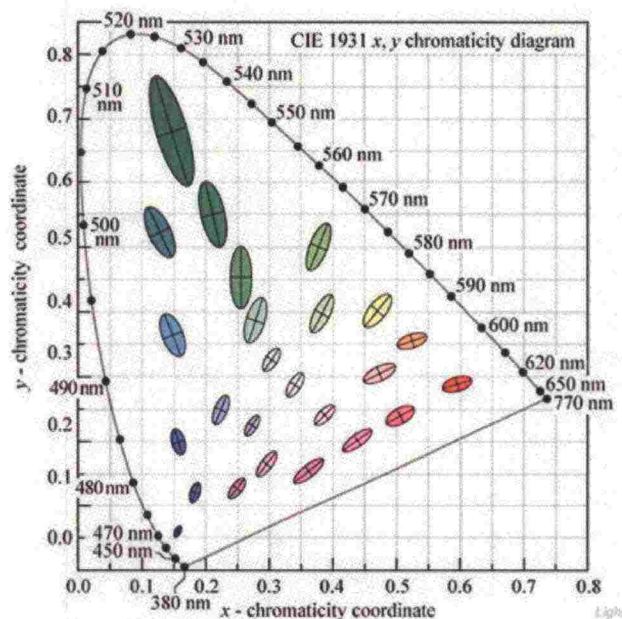


Kuva 9: IALA:n suosittamat merenkulun opasteissa käytettävät värit [9]

Näiden suositeltujen väriarvojen käyttäminen loiston värirajojen etsimisessä ei kuitenkaan toimi käytännössä, koska loistojen värit vaihtelevat ja kameran asetusten muuttaminen vaikuttaa ratkaisevasti digitaalisten kuvien väriarvoihin. Lisäksi sektorien rajan väriä ei ole määritetty, ainoastaan puhtaiden värien arvot [2]. Tämän takia onkin tarpeen tarkastella värin muuttumista rajalla ja verrata sitä kuvatus loiston puhtaiden sektorien väreihin.

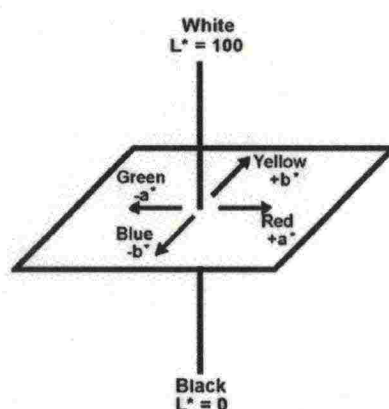
CIEXYZ-väriavaruus soveltuu kuitenkin huonosti värinmuutoksen seuraamiseen, koska se ei ole havainnollisesti tasainen. Tämä tarkoittaa sitä, että tietty etäisyys koordinaatiston pisteiden välillä ei vastaa yhtä suurta havainnollista värieroa joka puolella koordinaatistoa. [10] Tällä on merkitystä tämän työn kannalta, koska loiston värin muutosta tarkastellaan digitaalisessa muodossa, mutta rajakohdan tulisi vastata silmin havainnoitua väriä. CIEXYZ-koordinaatiston havainnollista epätasaisuutta kuvaavat MacAdamsin ellipsit kuvassa 10.

Ellipsien sisään jäävät alueet koetaan samanvärisinä kuin niiden keskipisteessä olevat referenssivärit. Vasta ellipsin ulkopuolella on havaittava väriero referenssiväriin verrattuna. [12] Kuten kuvasta näkee, ovat ellipsit erikokoisia eri puolilla koordinaatistoa. Kuvan ellipsien akselien pituudet on kerrottu kymmenellä erojen havainnollistamiseksi.



Kuva 10: MacAdamsin ellipsit

CIEXYZ-koordinaatistosta tehdään muunnos CIELAB-avaruuteen, joka on havainnollisesti melko tasainen. Tämän lisäksi CIELAB on kolorimetrinen, eli samanvärisiksi havaitut värit saavat yhtä suuret arvot koordinaatistossa. Tässä koordinaatistossa l kuvaa pisteen valoisuutta, a kuvaa pisteen paikkaa suoralla punainen-vihreä ja b kuvaa pisteen paikkaa suoralla sininen-keltainen. [13] Koordinaatisto on kuvassa 11.



Kuva 11: CIELAB-koordinaatiston koordinaatit [13]

CIELAB-koordinaatisto saadaan epälineaaraisella muunnoksella CIEXYZ-avaruuden pisteistä seuraavan kaavan mukaisesti.

$$\begin{aligned}
 L &= 116 \cdot h\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - 16 \\
 a &= 500 \cdot \left[h\left(\frac{X}{X_w}\right) - h\left(\frac{Y}{Y_w}\right) \right] \\
 b &= 200 \cdot \left[h\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - h\left(\frac{Z}{Z_w}\right) \right] ,
 \end{aligned} \tag{3}$$

missä

X_w , Y_w ja Z_w ovat referenssivalkoisen tristimulusarvot ja

$$h(q) = \begin{cases} \sqrt[3]{q} & q > 0,00885 \\ 7,787q + \frac{16}{116} & q \leq 0,00885 \end{cases} \tag{4}$$

Etäisyys kahden CIELAB-koordinaatiston pisteen L_1 ja L_2 välillä lasketaan euklidisena etäisyytenä

$$dE = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} . \tag{5}$$

CIELAB-värimalli on melko yksinkertainen ja ei täysin havainnollisesti tasainen, mutta monimutkaisemmat värimallit vaatisivat enemmän tietoa luotettavaan värinluokitukseen kuin mitä RGB-kuvasta on saatavissa. Tämän lisäksi loiston valon väriarvoja on keskiarvotettava jokaisen välähdyksen ajalta, jolloin värintunnistukseen käytettävä data on melko epäspesifistä. Tämän takia monimutkaisempi värimalli ei todennäköisesti olisi tarkempi.

CIELAB-värimalli soveltuu huonosti värin luokitukseen, se sopii paremmin etäisyyksien dE laskemiseen kahden eri värin välillä. [13] Värirajan tunnistus perustuukin näiden etäisyyksien laskemiseen värinmuutosalueella.

Sektorivalon valotunnukset

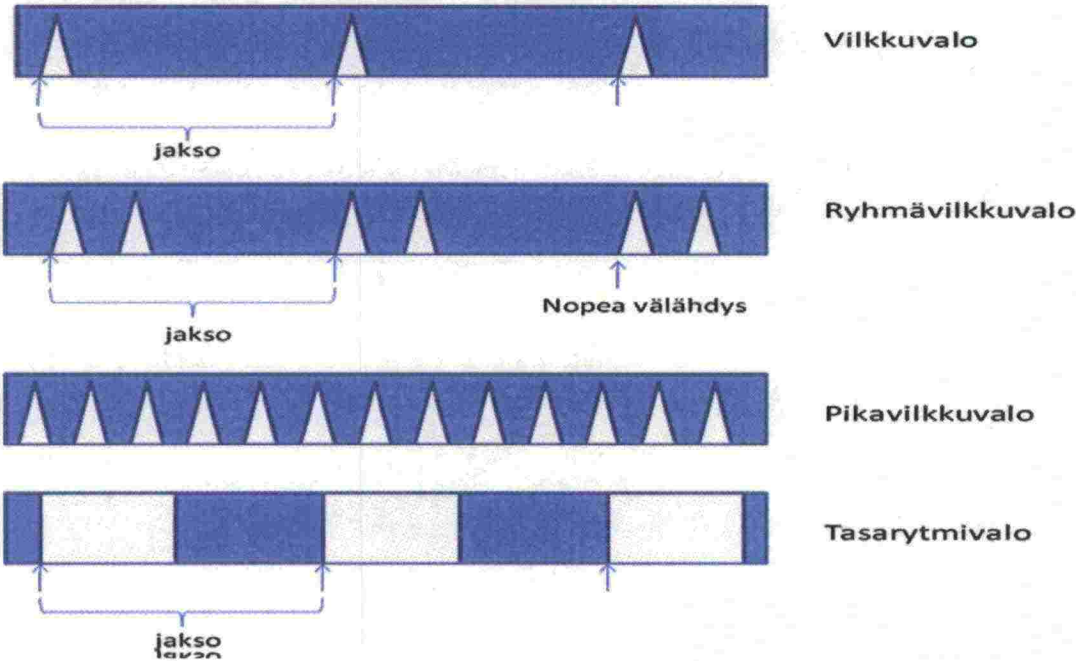
Sektoriloistot ja myös muut merellä olevat turvavalot palavat useimmiten välähdellen. Lähellä toisiaan olevien valojen pimennysaika ja palamisaika yhden jakson ajalta on tehty erilaisiksi, jotta valot erottuisivat toisistaan paremmin. Tätä valolle ominaista jaksoa sanotaan sen valotunnukseksi.

Erityyppisiä IALA:n suosittelemia valotunnuksia on 16 erilaista, joista pääosin neljää tyyppiä käytetään sektoriloistojen valotunnuksissa Suomessa. Tämä kävi ilmi tutkimalla lähteen [3], ”Suomen rannikon loistot”-kirjan loistoluetteloa, joista yli 95% oli näiden neljän tyyppin mukaisia. Toista Merenkulkuhallituksen julkaisemaa kirjaa, ”Sisävesien loistot” ei ollut saatavilla, mutta on oletettavaa, että Suomen järvien loistojen valotunnukset noudattavat samoja periaatteita kuin rannikkovesilläkin. Taulukossa 1 esitellään nämä neljä yleisintä valotunnusta.

Taulukko 1: Sektoriloiston valotunnukset

Nimi	Kuvaus	Kommentit
Vilkkuvalo	"Yhteenlaskettu valo aika yhdessä jaksossa selvästi lyhyempi kuin yhteenlaskettu pimennysaika. Vilkut yleensä yhtä pitkiä." [3]	Yleisin valotunnus sektori- valoille. Vilkun pituus vaihtelee useimmiten 0,15-2 sek, pimennysaika yleensä yli 1 sek, vaihtelee pääsääntöisesti välillä 1-7 sek.
Ryhmävilkkuvalo	Vilkkuvalo, jossa 2-3 vilkkua toistuu säännöllisesti. [3]	Yhden jakson välähdykset tulevat yleensä alle sek. välein, jonka jälkeen yli sek. pituinen tauko ennen uuden jakson alkua
Pikavilkkuvalo	"Valo, jonka toistotaajuus on vähintään 50 ja enintään 80 vilkkua minuutissa." [3]	Yleisin jakso 60 välähdystä/min
Tasarytmivalo	Palamis- ja pimennysajat yhtä pitkiä. [3]	Melko harvinainen sektori- loistoilla. Vilkun ja pimennyksen kesto yleensä 1-2 sek. luokkaa.

Kuvassa 12 on havainnollistettu näitä neljää valotunnustyyppiä.



Kuva 12: Sektoriloistojen valotunnukset [3]

Sektorirajojen automaattinen tunnistus

Nykyään sektorirajat tarkastetaan Suomessa käyttämällä apuna Reimari-järjestelmää. Reimari on tietokoneohjelma, jonka avulla sektorirajojen tarkastaminen voidaan tehdä järjestelmällisesti. Reimari on yhdistetty DGPS-vastaanottimeen (Differential Global Positioning System). Rajojen tarkastaminen tehdään siten, että ajetaan veneellä hitaasti, noin 1-2 solmun nopeudella, kohtisuoraan sektorirajan yli ja painetaan värin vaihtuessa välilyöntiä. Tarkastus tehdään noin kilometrin etäisyydeltä loistosta. Rajojen tarkastaja arvioi rajan vaihtumiskohdan visuaalisesti. Reimari merkitsee tämän paikan koordinaatin muistiin ja kun loistovalon koordinaatti on tiedossa, laskee se sektorirajan suunnan. Rajan mittausta on tehtävä kymmenen kertaa, minkä jälkeen koordinaatti keskiarvotetaan mittausvirheiden minimoimiseksi. [4]

Tarve automaattiselle tunnistukselle

Tarkastajasta riippuen nyky menetelmällä saatu sektorirajan paikka voi vaihdella tarkastusvälikäytännöllä jopa 100 metriä [1]. Jokainen tarkastaja näkee värin vaihtuvan hieman eri kohdassa johtuen värien sekoittumisesta sektorien raja-alueilla, taustavalaistuksen vaihteluista ja yksilöllisestä värien havainnoimisesta. Ajettaessa veneellä 1-2 solmun nopeudella kohtisuoraan sektorirajaan nähden, vaihtuu rajakohdalla loiston väri hyvin hitaasti. Tämän takia tarkastajan on hyvin vaikea arvioida, millä kohdalla väri on vaihtunut kokonaan. Tämä on suurin syy automaattisen tunnistuksen tarpeelle. Sektorien väri saattaa vaihdella eri loistojen välillä johtuen monenlaisista värisuodattimista. Myös tämä vaikeuttaa tarkastajan työtä, koska puhtaan sektorin väriä ei tiedetä etukäteen. Rajoja kuvattaessa voitaisiin päätös sektorirajan paikasta tehdä vasta sitten, kun olisi kokonaan siirrytty toiselle sektorille ja lopullinen sektorin väri tiedettäisiin.

Rajoja joudutaan tarkastamaan, koska esimerkiksi loiston lampun vaihtaminen saattaa vaikuttaa valon suuntautumiseen. Tämä pitää ottaa huomioon lampun ollessa hehkulamppu, koska hehkulangan horisontaalinen paikka voi vaihdella lampuissa. Tällöin värisuodattimen läpi kulkeva valo näkyy hieman eri suuntaan kuin alun perin [2]. Loistorakennuksen ulkopuolella olevat suodattimet ovat säälle alttiina ja saattavat hajota. Jos värisuodattimen kulmasta on esimerkiksi haljennut palanen, näkyy tästä raosta valkoista valoa kielletyn sektorin suuntaan. Myös loiston korjauksen yhteydessä on syytä tehdä rajojen tarkastus. [4] Arvion mukaan kaikkien Suomen 1917 rajan tarkastamiseen kuluu 80 työpäivää, kun yhden rajan tarkastamiseen kuluu 20 minuuttia [4]. Automaattinen tunnistus säästäisi aikaa ja vaivaa, kun jokaisen rajan yli pitäisi ajaa vain kerran. Jotkut loistot tarkastetaan kerran tai kaksi kertaa vuodessa, toiset harvemmin ja huoltojen yhteydessä. [4]

. Tällä hetkellä tarkastus pitää tehdä öisin, jolloin loisto erottuu parhaiten ympäristöstään. Automaattisen tunnistuksen ollessa riittävän kehittynyt, voitaisiin tarkastukset tehdä valoisammalla. Kuitenkaan kirkkaassa päivänvalossa loistojen kuvausta ei ole mahdollista tehdä, koska loistot sytytetään hämärällä. Loistojen valovoimakkuus ei riittäisi muutenkaan päivällä tehtävään tarkastukseen.

Projektin edelliset vaiheet

Sektoriloiston värirajojen tunnistamista digitaalikuvista on tutkittu Mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksella kahdessa erillisessä projektissa ennen vuotta 2007. Esiselvitysprojekti tehtiin vuonna 2005, jossa tutkittiin erilaisten digitaalikameroiden ja digitaalivideokameroiden soveltuvuutta sektoriloiston kuvaamiseen [1]. Vuonna 2006 projektin toisessa vaiheessa loistoja kuvattiin Foculus 432SC-konenäkökameralla [7].

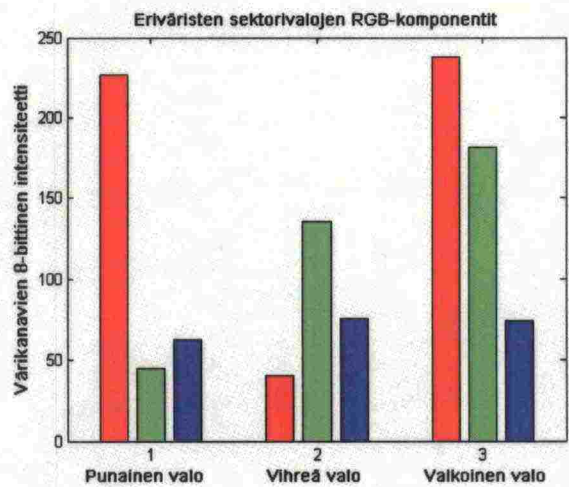
Esiselvitysprojekti

Vuonna 2005 Petri Österberg ja Antti Vehkaoja TTY:n Mittaus- ja informaatiotekniikan laitokselta tekivät esiselvityksen mahdollisuudesta tehdä sektoriloiston värirajojen paikannus käyttämällä kameraa ja kuvankäsittelyalgoritmia. Tämän selvityksen tarkoituksena oli kartoittaa eri mahdollisuuksia ja ongelmia, joita järjestelmän toteuttamiseen liittyy. Projektin tutkijat keräsivät mittausdataa Näsijärven Siilinkarin sektoriloistolta digitaalijärjestelmäkameralla ja digitaalivideokameralla kokeillen kameroiden eri säätömahdollisuuksia. [1]

Zoom-objektiivin huomattiin sopivan hyvin loistojen kuvaamiseen, koska sen avulla loistopiste saatiin leviämään usean pikselin alueelle. Tällöin yhden pikselin kohdalle tullut valon määrä pieneni, jolloin kuvapisteen saturoitumiselta vältyttiin. Järjestelmäkameran valotusaika oli valittava taustavalon määrän perusteella. Melko pitkää, 0,25-0,33 sekunnin valotusaikaa käyttämällä kennolle tuli riittävästi valoa pimeällä kuvattaessa. Toisaalta näin pitkä valotusaika ei sovellu nopealla taajuudella vilkkuvaan loiston kuvaamiseen. Aukon koon ja ISO-luvun (International Organisation for Standardization), eli kameran valoherkkyyttä kuvaavan luvun, tuli olla maksimissa, jotta saapuvan valon määrä olisi mahdollisimman suuri. Vertailtaessa videokameraa ja tavallista digitaalikameraa havaittiin, että videokameran etuna oli suurempi kuvaustaajuus ja heikkouksina suurempi vahvistuksen tarve valotusajan ollessa lyhyempi, ja tästä aiheutuva kohina, sekä pienempi resoluutio. Nämä molemmat puutteet osoittautuivat myöhemmin kuitenkin varsin merkityksettömiksi. [1]

Mittausdataa analysoitiin MATLAB-ohjelmalla tehdyllä kuvankäsittelyalgoritmillä. Havaittiin, että kameroiden automaattinen gammakorjaus vääristi kuvia, minkä takia kuvat tallennettiin raakakuvina ilman korjauksia. Mittaukset tehtiin pimeällä ilman taustavaloja, jolloin ainoa valonlähde kuvassa oli sektoriloisto. Tämä etsittiin kuvasta, jonka jälkeen sitä ympäröivät kuvapisteen nollattiin maskilla. Loistopiste jaettiin punaiseen, vihreään ja siniseen komponenttiinsa, jotka tallennettiin ja keskiarvotettiin välähdyksen ajalta. Värikanavien arvoja ja niiden suhteita toisiinsa käytettiin värirajojen alustavassa tunnistuksessa. Värikomponentteja tutkittaessa huomattiin, että eri sektoreiden värit eivät olleet puhtaasti yhtä väriä, mutta sektoreiden värierot olivat kuitenkin riittävän suuret luotettavaan tunnistamiseen. Kuvassa 13 on sektorivalojen RGB-komponentit eriteltyinä digitaalijärjestelmäkameralla kuvattuna. [1]

Videokameralla kuvattaessa kävi ilmi, että sen intensiteetti ja väri ovat epävakaat loiston syttyessä ja sammussa. Tämän takia tulisikin vilkahduksen väri tulkita sen palaessa täydellä teholla. Videokamera koettiin toimivaksi, ja sellaisen tai konenäkökameran käyttöä jatkohankkeissa suositeltiin. [1]



Kuva 13: Sektoreiden RGB-komponentit digitaalijärjestelmäkameralla kuvattuna [1]

Tutkimuksessa selvitettiin myös kameran automaattisen vakauttamisen mahdollisuuksia merenkäynnistä aiheutuvan heilumisen kompensoimiseksi. [1]

Projektin toinen vaihe

Esiselvitysprojektin perusteella SEKLO-projektin (Sektoriloisto) seuraavaan vaiheeseen valittiin kameraksi FireWire-liitynnällä varustettu Foculus 432SC-konenäkökamera. Käyttöön otettiin Magellan 315 GPS-paikannin helpottamaan sektorirajan paikantamista. GPS-paikannin oli käsikäyttöinen, joten kuvadataa ei saatu sidottua GPS-dataan. Tämän takia tarkka rajojen paikantaminen ei ollut tässä projektin vaiheessa mahdollista, vaan tavoitteena oli luotettava rajojen tunnistaminen käyttäen MATLAB-kuvankäsittelyalgoritmia. Myös tässä vaiheessa kuvauksia tehtiin ideaaliolosuhteissa, eli ilman taustavaloa tai muita kuvassa näkyviä valopisteitä.[7]

Kuvausdataa analysoitaessa havaittiin, että sektorirajojen vaihtumisen tunnusluvuiksi eivät sopineet värikanavien arvot sellaisenaan, vaan parempia tuloksia saatiin käyttämällä tunnuslukuina eri värikanavien suhteita. Taulukossa 2 on esitetty Siilinkarin loiston värirajojen tunnistamisessa käytetyt arvot.

Taulukko 2: Värimäärityssäännöt [7]

Väri	Ehto
Valkoinen	$G/B > 1,7$
Punainen	$R/G > 10$
Vihreä	$B/R > R/G$

Algoritmi toimi luotettavasti ja tunnisti rajat samaan paikkaan, mutta tarkan GPS-datan puuttuessa ei tiedetty, kuinka lähellä tunnistetut rajat olivat teoreettisia värirajojen paikkoja. Lisäksi mahdollisten sävyerojen eri loistojen välillä ja eri valaistusolosuhteiden todettiin vaikuttavan algoritmin luotettavuuteen. [7]

Toteutettavan järjestelmän vaatimukset

Toteutettavan järjestelmän tehtävät ovat kuvadatan ja GPS-koordinaattien reaaliaikainen tallentaminen kuvauksen aikana, GPS-datan synkronointi kuvadatan kanssa, kuvainformaation perusteella tapahtuva värianalyysi ja sektorirajojen tunnistaminen ja paikantaminen. GPS-koordinaatit, joilla sektori vaihtuu, pitäisi tämän jälkeen lähettää Suomen Merenkululaitoksen ylläpitämälle Reimari-järjestelmälle. Reimari laskee sektorirajan suunnan sille lähetettyjen koordinaattien ja loiston koordinaattien perusteella.

Järjestelmä tuli toteuttaa MATLAB-ympäristössä. Kameran kaappaamat kuvakehykset ja GPS-vastaanottimen datapaketit tuli lukea MATLAB:in kautta. Projektin aiemmissa vaiheissa tehtyä kuvankäsittelyalgoritmia tuli kehittää ja sen toimintaa testata aidoissa mittaolosuhteissa. Mittausjärjestelmään tuli toteuttaa käyttöliittymä, josta kuvaaminen ja sektorirajojen tunnistus voitaisiin tehdä.

Eri sektoriloistojen värit ovat erilaisia johtuen erilaisista värisuodattimista, joilla punainen ja vihreä sektori saadaan aikaan. Tästä mittausjärjestelmästä olikin tarkoitus tehdä mahdollisimman robusti, jolla erilaisten loistojen luotettava värirajojen paikkojen hakeminen olisi mahdollista. Järjestelmän on tarkoitus merkitä väriraja niille koordinaateille, joissa ihmissilmäkin havaitsee värin muuttuvan.

Työssä käytetty laitteisto

Työssä käytetty mittauslaitteisto koostui kannettavasta tietokoneesta, johon oli liitetty konenäkökamera sekä GPS-vastaanotin. Liityntä kameran ja tietokoneen välillä tapahtui IEEE 1394 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a-standardin mukaisella liittymällä toiselta nimeltään FireWire-liittymällä. Liittymän nopeus on 400 Mb/s. GPS-paikantimena käytettiin Garminin 18 LVC- laitetta, joka liitettiin tietokoneeseen USB-portin kautta. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan jokaisen laitteen rooli sektorirajojen mittaamisessa.

GPS-vastaanotin

GPS-vastaanotin tarvittiin vastaanottamaan GPS-signaalia sektoriloiston kuvausten ajaksi jotta mahdollisimman tarkat sektorirajan vaihtumisen koordinaatit saataisiin selville. Differentiaali-GPS-vastaanotin olisi ollut koordinaateiltaan tarkempi kuin tavallinen GPS-laitte, mutta DGPS-vastaanottimien korkea hinta esti sellaisen hankkimisen. Kuitenkin GPS- ja DGPS-laitteiden käyttäjälle lähettämä dataformaatti on samanlainen, joten tulevaisuudessa GPS-laitteen korvaaminen DGPS-vastaanottimella sujunee ongelmitta. Laitteessa tuli olla joko USB- tai COM-liityntä (sarjaporttiliityntä) PC:hen. Työssä ei siis käytetty käsikäyttöistä näytöllistä vastaanotinta, koska GPS-laitteen antamat koordinaatit piti saada synkronoitua kuvadatan kanssa. Myöskään GPS-vastaanottimille tarkoitettut karttaohjelmistot eivät olleet tarpeen sovelluksessa. GPS-vastaanotinta valittaessa kiinnitimme huomiota muun muassa

laitteen seuraaviin ominaisuuksiin: liityntätapa PC:hen, sisäänmenojoännitteen suuruus, signaalin päivitysnopeus ja herkkyys.

Tavallisimpia liityntätapoja olivat sarjaliityntä, USB-liityntä sekä Bluetooth. Toimintavarmuuden takaamiseksi hylkäsimme Bluetooth-liitynnäiset vaihtoehdot ja valitsimme USB-vastaanottimen, koska USB-liitynnällä on mahdollista siirtää laitteelle käyttöjoännite. Laitteita kartoittaessa kävi ilmi, että signaalin päivitysnopeus oli suurimmassa osassa laitteita 1 Hz. Sektorirajoja mitattaessa tarvitaan suurempaa aikaresoluutiota, mutta veneen kulkiessa vakionopeudella sektorirajan yli, voidaan sektorirajan koordinaatti määrittää interpoloimalla koordinaatteja lineaarisesti GPS-paketeista vastaanotettujen koordinaattien välille. Laitteen herkkyys oli myös yksi merkittävä tekijä, jotta laite havaitsisi GPS-signaalin luotettavasti erilaisissa mittausolosuhteissa.

Nämä ominaisuudet olivat melko samankaltaisia kaikissa tarkasteluun otetuissa GPS-vastaanottimissa, joten päädyimme tunnetun GPS-valmistajan Garminin GPS 18 LVC –laitteeseen. Tässä vastaanottimessa ei ollut alun perin liityntää tietokoneeseen, vaan ainoastaan virtajohtot ja johdot datansiirtoon, mutta siihen rakennettiin liityntä tietokoneen USB-porttiin USB-sarjamuuntimella. Sen lähettämä data tuli kuitenkin sarjamuotoisena ja sille voitiin avata MATLAB:ista yhteys sarjaporttina Ajurin asentamisen jälkeen GPS-vastaanotin näkyi MATLAB:iin sarjaportista COM4.

Käyttämällä MATLAB-ohjelman valmiita rajapintafunktioita sarjaliikenteen lukemiseen, saatiin GPS-vastaanottimen lähettämät paketit MATLAB:in muuttujiksi. Garmin GPS 18 LVC vastaanottaa kerran sekunnissa useita NMEA 0183 v.2.3-standardin muotoisia paketteja. NMEA on lyhenne sanoista National Marine Electronics Association. GPS-vastaanotin on esitetty kuvassa 14. [14]



Kuva 14: Garmin 18 LVC GPS-vastaanotin [15]

NMEA 0183-standardi

The National Marine Electronics Association on yhdysvaltalainen voittoa tavoittelematon yhdistys, jonka tavoitteena on kehittää merenkulun elektroniikkateollisuutta ja markkinoita. NMEA 018x-standardit ovat laajasti käytössä olevia GPS-vastaanottimien sähköisen liitynnän ja dataformaatin kuvaavia standardeja. Tähän työhön valittu GPS-laite käytti standardin

versiota NMEA 0183 v.2.3, jonka sisältöä seuraavassa selitetään tarkemmin. NMEA-standardit perustuvat yhteen lähettajaan, eli satelliittiin, ja useaan yhtäaikaan vastaanottajaan, eli maanpäällisiin GPS-vastaanottimiin.[14] Yksi GPS-vastaanotin on aina yhteydessä useampaan kuin yhteen satelliittiin.

NMEA-standardin dataformaatti on ASCII-muotoisia (American Standard Code for Information Interchange) paketteja tai lauseita, joita lähetetään useita per päivitysväli. Jokainen paketti alkaa \$-merkillä ja päättyy merkkeihin <CR><LF> (carriage return, line feed) ja on korkeintaan 82 merkkiä pitkä mukaan lukien aloitus- ja lopetusmerkit. Merkit lähetetään pilkuilla erotettuina. Merkit on koodattu kahdeksalla databitillä, yhdellä lopetusbitillä, ilman pariteettitarkastusta ja vuontarkastusta käyttäen little-endian-koodausta. Käyttäjä määrää baudinopeuden, jolla paketit lähetetään. Mahdolliset baudinopeudet vaihtelevat välillä 300-38400 merkkiä/sekunti. Oletusbaudinopeus on 4800 b/s. Lähetetyt lauseet voivat olla tyypiltään lähettäjän lauseita (talker sentence), valmistajan lauseita (proprietary sentence) tai vastaanottajan pyyntöjä (query sentence). Lähettäjän lauseiden alussa on kaksi merkkiä, jotka identifioivat lähettäjän. Seuraavat kolme merkkiä identifioivat lähetettävän lauseen tyyppin. Sitten seuraa varsinainen data, joka päättyy valinnaisen tarkistussumman jälkeen lauseen loppumismerkkeihin. Datatyyppejä on useita erilaisia, joista jotkut saapuvat vastaanottimille automaattisesti ja jotkut ovat valinnaisia. GPS-vastaanottimien valmistajat voivat standardin mukaan lähettää haluamaansa dataa käyttäjille. Nämä lauseet alkavat merkeillä \$P, jonka jälkeen seuraa valmistajan tunnus. Vastaanottajan pyynnöllä käyttäjä voi pyytää tiettyä pakettia lähetettäväksi.[14]

Sijainnin leveys- ja pituusaste otettiin talteen GPGBA-paketista. GPGBA-paketin nimi on Global positioning system fix data [15]. Muut paketit olivat tarpeettomia tässä sovelluksessa, joten niiden päivittäminen lopetettiin lähettämällä PGRMO-paketti vastaanottimelle. PGRMO-paketin nimi on Output sentence enable/disable ja sillä voidaan ilmoittaa vastaanottimelle, mitä paketteja halutaan vastaanottaa [15]. Seuraavassa kuvataan GPGBA-paketin muoto ja sisältö.[15]

$\$GPGBA,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,M,<10>,M<11>,<12>,*hh<CR><LF>$

Taulukko 3: GPGBA-paketti [15]

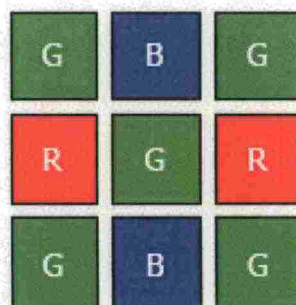
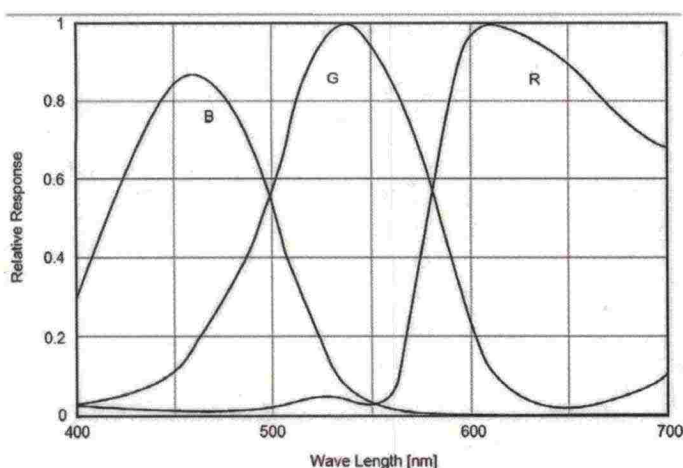
	GPGBA (Global positioning system fix data)
<1>	UTC-aika(Universal coordinated time, nolla-meridiaanin aika), muodossa hhmmss
<2>	Leveysaste muodossa ddmm.mmmm
<3>	Leveyspiiri, N tai S, pohjoista tai eteläistä leveyttä
<4>	Pituusaste muodossa ddmm.mmmm
<5>	Pituuspiiri, E tai W, itäistä tai läntistä pituutta
<6>	GPS-signaali laatu/tarkkuus, 0=ei korjausta; 1=ei-differentiaali-GPS-korjaus saatavilla; 3=differentiaali-GPS-korjaus saatavilla; 6=arvioitu korjaus
<7>	Käytössä olevien satelliittien määrä, 00-12
<8>	horisontaalinen epätarkkuus-indikaattori, 0,5-99,99
<9>	vastaanottimen korkeus merenpinnasta, -9999,9-99999,9 metriä
<10>	Geoidal-korkeus, -999,9-9999,9 metriä
<11>	Nolla (DGPS)
<12>	Nolla (differential reference station)

Taulukossa 3 on GPGBA-paketin sisältö kenttä kentältä. Tarvittavia tietoja olivat vain koordinaatit, eli kohdat <2> - <5> sekä kohta <7>. Satelliittien määrä on hyödyllinen tieto, jota seuraamalla GPS-vastaanottimen saa asetettua paikalle, josta näkyvyys satelliiteille on riittävä. Vastaanottoon saapuu paketteja, vaikka ilmoitettu käytössä olevien satelliittien määrä olisi nolla, mutta tällöin paikannusdata ei ole luotettavaa. Tästä paketista löytyy myös signaalin laadun indikaattori, josta selviää, onko DGPS-korjaus saatavilla.

Kamera

Työssä käytettiin konenäkökameraa, jolla pystyi tuottamaan raakakuvia tai väri-interpoloituja kuvia käsiteltäviksi. Tavallisen digitaalikameran tai videokameran automaattiset kuvankäsittelyoperaatiot olisivat poistaneet informaatiota kuvista, minkä takia käytettiin konenäkökameraa. Etenkin automaattiset valotusajan korjaukset olisivat vääristäneet tuloksia tai vaikeuttaneet värien tunnistusta. Konenäkökameran kaikki kuvankäsittelyoperaatiot sai valita ohjelmallisesti. Kameran mukana tulleen demo-ohjelman avulla tai MATLAB:in kautta säädettävät ominaisuudet olivat valoisuus, terävyys, valotusajain, hue, saturaatio, gammakorjaus, valotusaika, vahvistus ja liipaisu. Kameran objektiivista sai säädettyä käsin aukon kokoa, tarkennusta ja zoomia. [17] Valituista asetuksista kerrotaan alaluvussa 4.2.

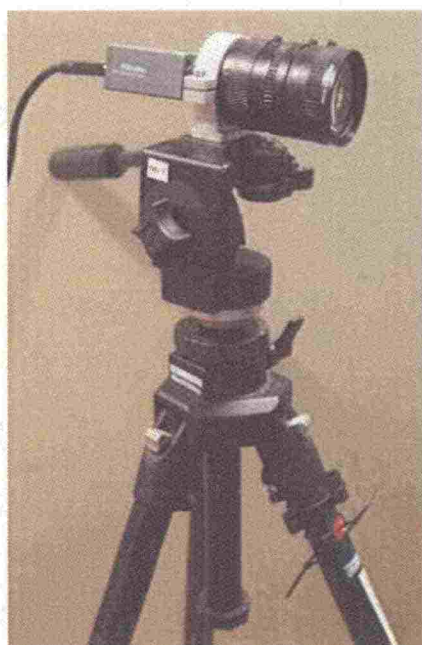
Kamerana oli Net Foculus FO432SC. Tämän kameran CCD-kennon resoluutio oli 1388x1036 ja kennon koko $\frac{1}{2}$ tuumaa [16]. CCD on lyhenne sanoista Charge-Coupled Device ja tarkoittaa varauskytettyä komponenttia. Näin suurta resoluutiota ei tässä sovelluksessa kuitenkaan tarvittu. Tärkeämpää oli saada kuvattu sektoriloiston valopiste leviämään monen pikselin alueelle. Tämä saatiin asettamalla tarkennusta huonommaksi tai zoomaamalla loistoa. Tärkeää oli myös suuri kennon herkkyys, jotta kamera rekisteröisi himmeätkin loistot. Kennon herkkyys eri valon aallonpituuksille on esitetty kuvassa 15. Huonona puolena kamerassa oli se, että se tuotti värikuvia ainoastaan 8-bittisinä [16]. Tämän takia kameran valotusaika, vahvistus ja kirkkauden säädöt tuli asettaa hyvin tarkasti, jotta välttyttiin kuvapikselien satureitumiselta kuvattaessa kirkkaita sektoreita ja että saatiin kuitenkin riittävästi valoa himmeämmiltä sektoreilta. Kameran kennossa on Bayer-matriisi, josta punainen, vihreä ja sininen komponentti saatiin väri-interpolaatiolla. Bayer-matriisi on kuvassa 15 nähdyn kaltainen [16].



Kuva 15: Kennon herkkyys ja Bayer-matriisi [17]

MATLAB teki väri-interpolaation raakakuvasta automaattisesti, joten MATLAB-rajapintaan kuvat tulivat RGB-muodossa. Kameran liityntänä tietokoneeseen oli FireWire (IEEE-1394a), jonka nopeus on 400 Mbit/s. Kameran suurin kuvaustaajuus oli 15 Hz, joka on sopiva loistojen kuvaamiseen. [16]

Kamerasta saadut kuvakehykset luettiin MATLAB -ympäristöön soveltaen MATLAB:in Image acquisition -toolboxin funktioita ja MATLAB:in GUIDE:lla (Graphical User Interface Design Environment) tehtyä käyttöliittymää. Itse kamerassa ei ole minkäänlaisia säätönappeja kuten normaalissa digitaalikamerassa, vaan kameran ohjaus tapahtuu tietokoneelta. Kameran takaosassa on liittynät virtajohdolle ja datan siirtoon sekä kameran tilasta kertova LED-valo. Etuosassa on kiertet objektiivin kiinnitykseen. [16] Kamera on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16: Kamera ja objektiivi kytkettynä jalustaan [7]

Objektiivi

Kamerassa oli objektiivina Pentax C60812 (H6Z810) zoom-objektiivi, joka on esitetty kuvassa 17. Objektiivista oli mahdollista säätää aukon kokoa, fokusta sekä zoomia. Polttoväliä sai säädettyä välillä 8-48 mm. Kameran aukon kokoa sai säädettyä välillä F1,0 - 22. [17] F-luku on suhteellisen aukon käänteisluku ja se lasketaan $\frac{f}{d}$, missä f on polttoväli ja d tulopupillin halkaisija. Avautumiskulmaa sai säädettyä zoomilla, horisontaalinen kuvakulma oli säädetävissä 7,73-43,26 asteen välillä.[18]



Kuva 17: Pentax C60812 (H6Z810)-objektiivi [17]

PC

Tietokoneena työssä oli IBM Z61p-tyyppinen kannettava tietokone Windows Vista-käyttöjärjestelmällä. Prosessorin nopeus oli 2 GHz ja koneessa oli 2046 MB keskusmuistia. Käytössä oleva MATLAB oli versio 7.4.0.287. Loistoja kuvatessa tietokone voitiin kytkeä sen omalla virtalähteellä invertterin kautta veneen akkuun. Käytössä ollut invertteri muunsi akun 12 Voltin DC-muotoisen jännitteen 230 Voltin verkkovirraksi.

Järjestelmän kuvaus

Loistojen kuvaaminen ja niiden sektorien rajakohtien tunnistaminen ovat järjestelmän kaksi päätoimintoa, jotka eivät voi olla päällä samanaikaisesti. Tähän on syynä se, että molemmat ovat huomattavasti tietokoneen prosessorin ja MATLAB:in resursseja vaativia prosesseja, joiden samanaikainen ajaminen hidastaisi kumpaakin. Hidastuminen olisi merkityksellistä kuvausprosessissa, koska esikatselu-ikkunan riittävän nopea päivitys on oleellista, jotta nähdään mitä kuvataan. Myös kuvan tallennuksen ylimääräinen hidastuminen olisi ongelmallista, koska kuvan tallentaminen koneen kovalevylle on muutenkin hitaampaa kuin kuvien saapuminen MATLAB:iin, jolloin kuvat tallennetaan muistiin. Muistinkulutuksen minimoiminen olikin yksi työn kulmakivistä. Tunnistuksen aloittaminen kuvauksen ollessa käynnissä ei ole mahdollista, koska auki olevan AVI-tiedoston lukeminen ei ole mahdollista samaan aikaan kun siihen kirjoitetaan. Se ei olisi muutenkaan mielekästä, koska rajakohtien tunnistaminen voidaan tehdä vasta, kun tiedetään, millaiset sektorivalon väriarvot ovat rajakohdan molemmilla puolilla.

Järjestelmä koostuu PC:stä, johon liitetään sarjaportin kautta GPS-vastaanotin ja FIREWIRE-liittynnän kautta konenäkökamera. Molempia ohjataan ja niiden lähettämää dataa luetaan MATLAB-ohjelman funktioilla. Järjestelmää ajetaan MATLAB:n GUIDE-työkalulla tehdyllä graafisella käyttöliittymällä. Järjestelmä käynnistetään MATLAB-komentoriviltä GUI:n nimellä "SekloGui". Aluksi ohjelmassa alustetaan yhteys kameraan ja GPS-vastaanottoon, minkä jälkeen näytölle ponnahtaa kaikki ohjelman toiminnot sisältävä käyttöliittymä.

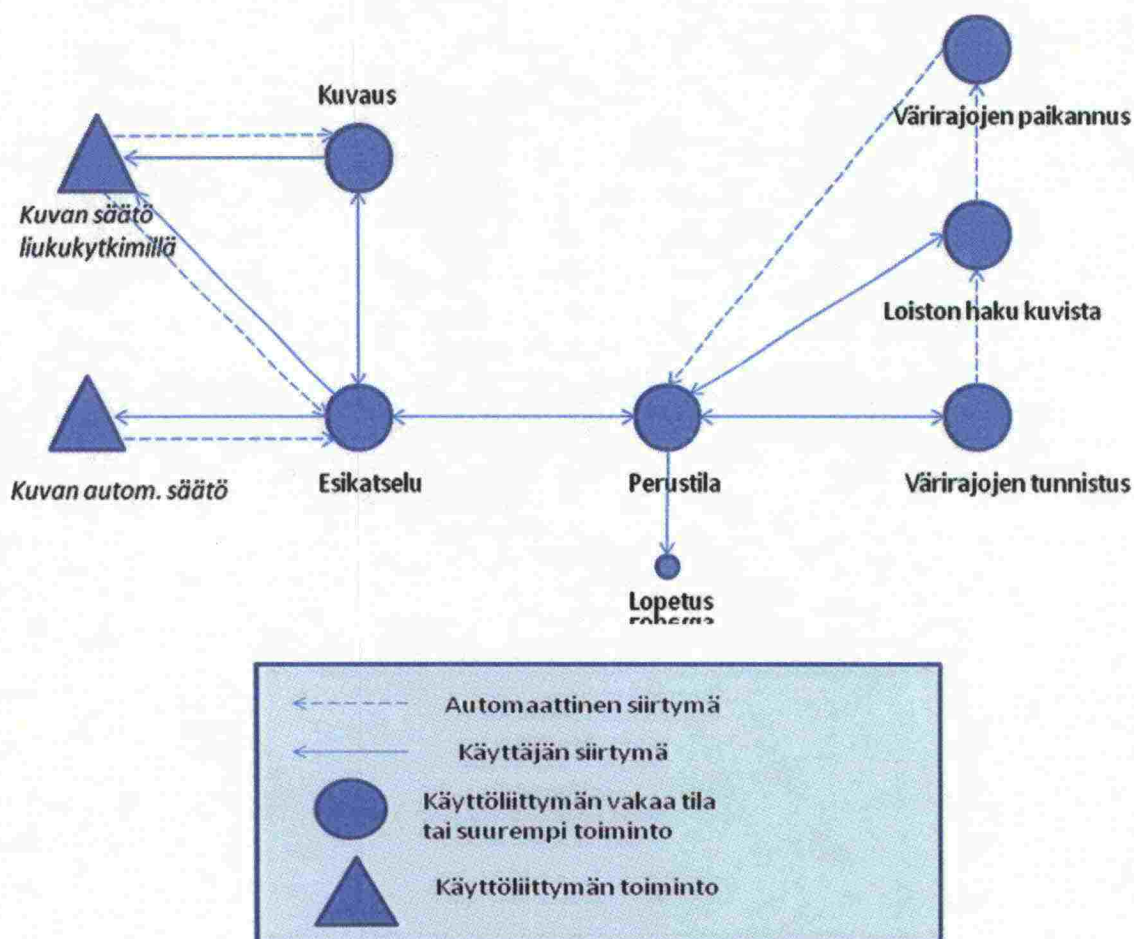
Kuvakehykset tallennetaan AVI-muotoisena tietokoneen kovalevylle kuvauksen edetessä. Väriarvojen tunnistaminen on erillinen toiminto, jossa valitusta tiedostosta avataan AVI-video ja kuvat käsitellään yksi kerrallaan. Kuvankäsittelyn ollessa valmis, tiedetään kuvakehyksen tai -kehukset, jolla loiston väri vaihtui, sekä koordinaatti, jossa tätä kuvaa ottaessa oltiin.

Kuvauksen aikana on tarkoitus ajaa 1-2 sektorirajan yli, jolloin kuvataan kaikki sektorivärit kerran tai kaksi väriä. Jokaista kuvattavaa väriä on kuvattava puhtaan sektorin alueelta yli 3 välähdyksen ajan.

Seuraavissa kappaleissa kerrotaan mittausjärjestelmän vaatimuksista, kehitysvaiheista sekä järjestelmän toiminnasta kuvauksen aikana sekä käyttöliittymän toiminnasta. Seuraavassa luvussa kerrotaan järjestelmän toisen päätoiminnon, värintunnistusalgoritmin toiminnasta ja taustalla olevia syitä käytetyille ratkaisuille.

Käyttöliittymän toiminnot

Testausta ja mittausdatan keräämistä varten MATLAB-ohjelman GUIDE-työkalulla tehtiin käyttöliittymä. Käyttöliittymän kautta käyttäjä on yhteydessä kameraan: kameran asetuksia voi säätää, kameran tuottamaa kuvaa voi katsella käyttöliittymän näytöltä ja kuvauksen voi aloittaa ja lopettaa. Kun loistoa on kuvattu, voidaan sektorirajojen tunnistaminen aloittaa käyttöliittymästä. Loiston valon RGB-arvoja kuvakehyksissä voi seurata näytöltä tunnistuksen edetessä ja sen loppuessa sektorirajat piirretään näytölle ja ilmoitetaan rajojen koordinaatit. Myös GPS-vastaanottimen tilaa voi seurata käyttöliittymästä.



Kuva 18: Käyttöliittymän toiminnot

Käyttöliittymä käynnistyy MATLAB-komentoriviltä komennolla ”*SekloGui*” tai ”*SekloGui(1)*”. Komennolla ”*SekloGui(2)*” käyttöliittymän saa käynnistettyä ilman kameraa tai GPS-vastaanotinta. Tällöin käyttöliittymästä on mahdollista tehdä ainoastaan aiemmin kuvattujen videoiden värirajojen tunnistus.

Kuvassa 18 on kuvattu käyttöliittymän toiminnot. Käyttöliittymä käynnistyy perustilaan. Tällöin tehdään käyttöliittymän muuttujien, kameran ja GPS-vastaanottimen alustukset. Tämän jälkeen jäädään odottamaan käyttäjän valintoja. GPS-koordinaatteja tulostetaan näytölle automaattisesti sen jälkeen, kun satelliitteihin on saatu yhteys. Käyttöliittymän näytöt on esitetty liitteessä 1.

Kameran säädöt

Käyttöliittymän Esikatselu-toiminnolla saadaan näytölle kameran kaappaamia kuvia. Näytön päivitystaaajuus asetettiin maksimiarvoonsa 15 Hz:iin. Esikatselun ollessa päällä tulee ikkunan vasempaan reunaan näkyville paneeli, jossa on liukukytкимиä kameran asetusten säätämiseen. Säädettäviä asetuksia ovat valoisuus, valotusaika, vahvistus ja terävyys. Paneelissa on myös pudotusvalikko, jonka vaihtoehdot ovat *Säädä automaattisesti* sekä *Palauta oletukset*. Oletusarvoiksi on valittu Siilinkarin testeistä sopiviksi valitut arvot.

Automaattinen kameran asetusten säätö ottaa napin painamisen jälkeen kuvan kameralla ja säätää asetukset sen perusteella. Tätä nappia painettaessa on siis tähdittävä kohti loistoa, jotta automaattinen säätö osaisi ottaa loiston kirkkauden huomioon. Automaattinen säätö tekee säätönsä kuvan pikselien keskiarvon ja maksimiarvon mukaan. Keskiarvo kertoo taustavalon määrän kuvassa ja maksimiarvo kertoo loiston mahdollisesta saturoitumisesta. Tavoitteena tällä funktiolla on säätää kuvan keskiarvo mahdollisimman matalaksi ja pitää maksimiarvo riittävän korkeana. Pieni keskiarvo tarkoittaa kuvassa useita nolla-arvoisia pikseleitä, joiden pakkaaminen ja levyille tallentaminen käy nopeasti. Kuvan keskiarvon ollessa liian suuri on kuvien tallennus hitaampaa kuin kuvien kaappaustaaajuus, jolloin kuvat tallennetaan väliaikaisesti muistipuskuriin. Videon tallennus epäonnistuu, jos muistinkulutus ylittyy kuvauksen aikana. Myös kuvan käsittely sektorirajanhakuvaiheessa, jossa taustavalokohteet on jo valmiiksi nollattu, käy nopeammin. Valoisuutta ja vahvistusta vähentämällä ja valotusaikaa pienentämällä saadaan tehokkaasti pienennettyä kuvan pikselien keskiarvoa. Näiden kaikkien asetusten säätäminen on yleensä tarpeellista, koska ne kaikki tekevät eri operaation. Vahvistus kertoo kuvan pikselien arvot vahvistuskertoimella, valoisuus nostaa tai laskee vakiolla kuvan pikselien arvoa vaikuttaen enemmän myös mustiin pikseleihin. Valotusaika vaikuttaa kuvaan samankaltaisesti kuin vahvistus. Tärkeimpänä erona vahvistuksen ja valotusajan säädöllä tämän sovelluksen kannalta on se, että pitkä valotusaika aiheuttaa loistovalon muodon vääristymisen johtuen kameran heilumisesta, kun taas vahvistus ei vaikuta loistovalon muotoon kuvassa, mutta lisää kuvaan kohinaa. Näitä asetuksia säädetään hieman kaikkia oikeaan suuntaan, jonka jälkeen otetaan uusi kuva. Jos kuvan keskiarvo on vielä liian korkea tai kuvan maksimipiste on saturoitunut, tehdään lisää korjauksia.

Kuvaaminen

Näytön oikeassa reunassa on alasetusvalikko, jonka valinnat ovat *Kuvaaminen* ja *Rajantunnistus*. *Kuvaaminen*-vaihtoehdon valitsemalla näytön oikeaan reunaan tulee kuvaamiseen liittyviä komponentteja. Kuvaaminen käynnistetään *Aloita kuvaus*-painonapilla. Tiedoston, johon video tallennetaan, voi kirjoittaa tekstikenttään tai sen voi määrittää omia tiedostojaan selaamalla painamalla *selaus*-nappia. *Aloita kuvaus*-napin nimeksi muutetaan *Lopeta kuvaus* kuvauksen käynnistyttyä. Videon pakkaamiseen tarkoitetun koodekin saa

kirjoittaa tekstikenttään, oletusarvona on *Indeo3*. Kun kuvaaminen käynnistetään, näkyvät näytöllä kuvaamiseen kulunut aika sekunteina sekä järjestelmän muistinkulutus, joka saattaa nousta kuvauksen aikana riippuen tallennettavien kuvien valoisuudesta. Kuvaus lopetetaan painamalla kuvaus-nappia uudestaan, jolloin nappi nousee ylös. Samaan kansioon videon kanssa tallentuvat myös GPS -paketit, kun kuvaus lopetetaan.

Väirajojen tunnistus

Tallennettujen kuvien käsittely aloitetaan painamalla näytön oikeasta reunasta *Väirajojen tunnistus*-paneelista *Aloita*-nappia. Ennen tunnistuksen aloittamista, kirjoitetaan halutun videon tiedostonimi paneelissa olevaan tekstikenttään. *MATLAB*:in heikohkon suorituskyvyn ja kuvankäsittelyalgoritmin raskauden takia esikatselun tulee olla pois päältä ennen kuin tunnistaminen voi alkaa. Kuvankäsittelyalgoritmin ja esikatselun yhtäaikainen ajaminen tekisi esikatselu-ikkunan päivittymisestä niin hidasta, että se ei näyttäisi videokuvalta.

Tunnistusalgoritmi ei voi alussa tietää miltä loisto näyttää tai onko kuvassa muita valonlähteitä, joten käyttäjän on osoitettava kuvasta oikea valopiste ennen kuvankäsittelyn alkamista. Tunnistuksen käynnistyessä näytetään käyttöliittymän näytöllä ensimmäinen kuvakehys, jossa on jokin valonlähde. Mahdolliset pimeät kehykset hypätään yli. Jos näytöllä olevassa kuvassa on muita valonlähteitä loiston lisäksi, on käyttäjän rajattava muut kohteet pois kuvasta zoom-toiminnolla.

Jos kuvassa ei ole muita valonlähteitä tai ne ovat loistoa himmeämpiä, ei zoomausta tarvita. Jos loistopistettä ei näy kuvassa, saa käyttäjä seuraavan kuvan näytölle painamalla *Seuraava*-nappia. Nappien alapuolella on valintaruutu, jonka valitsemalla seuraava-nappia painamalla siirrytään kymmenen kuvaa eteenpäin. *Korostettu kontrasti*-valintaruudun valitsemalla kuva näytetään niin, että sen RGB-komponentit ovat summattu. Tämän avulla himmeä loisto erottuu kuvasta paremmin. Kun loisto näkyy kuvassa, voi käyttäjä ilmoittaa ohjelmalle, että kuvauksessa ei ollut muita taustavalvoja painamalla valintaruudussa *Ei taustavalvoja*. Tämä valinta nopeuttaa hieman ohjelman suoritusta, kun loistonetsintäfunktio jätetään väliin. Käyttäjän painaessa *OK* kuvien käsittely alkaa, jolloin ohjelma valitsee kuvassa kirkkaimman valon loistoksi ja ottaa sen ominaisuuksia muistiin. Loiston RGB-arvoja piirretään näytölle 200 kuvan välein tunnistuksen edetessä.

Tunnistuksen saa keskeytettyä painamalla *Keskeytä*-painiketta. Tällöin algoritmi pysähtyy siihen kuvaan, joka on käsittelyssä ja jättää loput lukematta. Tunnistuksen loppuessa tallennetaan algoritmin tuottama väri- ja paikannusdata *MATLAB*-työmuistiin.

Muut toiminnot

Tiedosto-valikosta voi käynnistää käyttöliittymän uudelleen, alustaa GPS-vastaanottimen uudelleen, syöttää rajanhakualgoritmissa käytettävän loiston valotunnuksen ja sulkea käyttöliittymän. Myös *Lopeta*-napilla käyttöliittymä sulkeutuu ja keskeyttää kaikki käynnissä olevat prosessit. Nappia on kuitenkin tarkoitus painaa vain silloin, kun kuvaus tai tunnistus ei ole käynnissä, jotta yhteys kameraan, sarjaporttiin ja videotiedostoon saadaan suljettua.

Kameran asetukset ja kuvaus

Kameran asetusten säätäminen ennen kuvauksen aloittamista on tärkeää, koska samoja asetuksia ei voi käyttää kaikilla loistoilla johtuen eroista loistovalojen kirkkauksissa. Kuva on tarkoitus säätää mahdollisimman pimeäksi kuitenkin pitäen loiston koko ajan näkyvissä.

MATLAB-ohjelmalla tehdyllä ohjelmalla haasteena on kuvauksen aikana muistin kuormitus ja tietokoneen prosessoriajan jakaminen kuvankaappauksen, kuvien näytölle päivittämisen, kuvien tallentamisen ja GPS-pakettien lukemisen välillä.

Kameran asetukset

Käytössä olleen konenäkökameran kaikki asetukset saa säädettyä ohjelmallisesti tai käsin objektiivista. Tämä oli yksi syy, miksi konenäkökamera valittiin tavallisen digitaalikameran sijasta. Kuvat saadaan kamerasta reaaliaikaisesti MATLAB:iin, jolloin ne voidaan synkronoida GPS-datan kanssa. Yhteys kameraan saadaan MATLAB:ssa luomalla videoinput-objekti. Tämän objektin kautta päästään käsiksi kaikkiin ohjelmallisesti säädettävissä oleviin kameran asetuksiin. Kameralla on mahdollista ottaa harmaasävykuvia ja värikuvia resoluutioilla, jotka vaihtelevat välillä 640×480 – 1392×1040 [16]. Kuvaformaatiksi valittiin värikuva resoluutiolla 640×480 . Syynä tämän resoluution valitsemiselle on se, että kuvien kaappaus ja niiden näyttäminen esikatseluna ei toiminut moitteettomasti täydellä resoluutiolla käytetyllä kuvaustaajuudella 15 Hz, vaan kuvia jäi välistä niin, että MATLAB-rajapintaan ei saapunut joka sekunti 15 uutta kuvaa. Resoluutiolla 800×600 tätä ongelmaa ei enää ollut, mutta kuvien pakkaamiseen käytetty koodekki ei toiminut tällä resoluutiolla, joten valituksi tuli pienin resoluutio 640×480 . MATLAB osaa muuntaa raakakuvan moneen eri formaattiin. RGB-muotoinen kuva valittiin palautettavaksi muodoksi.

Kameran asetukset, joissa ei käytetä kameran oletusarvoja, tulee säätää aina kun yhteys avataan MATLAB-rajapinnan ja kameran välille. Kuvankorjausoperaatiot pidetään vakiona, jotta valkotasapainonkorjaus ja gammakorjaus eivät muuta kuvien komponenttien arvoja eri taustavalossa. Gammakorjauksen ja valkotasapainon korjauksen lukemat tulee pitää vakioina, jotta eri mittaukset olisivat keskenään vertailtavissa.

Manuaalinen valotusajan säätö estää valotusaikaa säätymästä liian suureksi. Automaattisesti se säätyisi hämärälle mahdollisimman suureksi, jolloin kuvassa näkyisi turhaan muitakin valonlähteitä loistovalon lisäksi ja valojen muodot vääristyisivät kameran heiluessa. Täysin pimeällä kuvattaessa, jolloin kuvaan ei tule muita valopisteitä kuin sektorivalo, voidaan valotusaikaa säätää suuremmaksi. Sektorivalon ollessa kuvan ainoa valonlähde, ei sitä tarvitse tunnistaa muiden pisteiden joukosta eikä sen muodollakaan ole silloin väliä. Maksimin valotusajalle tällöin antaa kuvankaappaustaajuus, oletusarvoisesti kameran suurin taajuus, 15 Hz [17]. Tavallisesti $1/15$ sekunnin valotusaika on riittävä himmeiden loistojen valottamiseen käytettäessä suurinta aukon kokoa. Tavallisesti noin 50 millisekunnin valotusaika havaittiin sopivaksi käytetylle kameralle ja objektiiville, koska se poistaa hämärässä kuvattaessa kuvasta taustavalon, mutta riittää sektorivalon valottamiseen.

Valoisuuden ja vahvistuksen säädöllä saadaan kuva pysymään mahdollisimman pimeänä, jotta turhaa taustavaloa ei rekisteröidä, tämä helpottaa loistopisteen etsimistä kuvasta. Liian suuri valoisuus nostaa kaikkien kuvapisteen arvoa ja liian suuri vahvistus aiheuttaa kuvaan pistemäistä kohinaa. Ensimmäinen tapaus saadaan yleensä korjattua nostamalla kuvan kynnystysarvoa, jolloin kuvasta saadaan poistettua tasainen intensiteetin nousu. Vahvistuksen aiheuttamaa kohinaa ei saa kuvasta helposti pois, jolloin kuvaan jää useita ylimääräisiä valoisia kohtia, jotka kuvankäsittelyalgoritmi joutuu käymään läpi etsiessään oikeaa loistopistettä muiden valopisteiden joukosta.

Liian suurta valoisuuden arvoa pitäisi välttää, koska käytetyn kameran suurin dynamiikka värikuville on 8 bittiä ja pikselien saturoituminen tapahtuu helposti. Myös kuvien

pakkaaminen on nopeampaa paljon nollia sisältävillä kuvilla. Himmeitä loistoja kuvattaessa ei kuvaan saisi tulla paljon kohinaa, koska kynnystysarvonkin pitää olla matala. Vahvistusta nostettiin hieman kameran oletusasetuksesta. Terävyyttä nostettiin hieman, jotta kuvan tasaiset alueet saataisiin ylipäästösuodatettua pois ja kuvaan jäisivät vain taustasta poikkeavat valonlähteet [16]. Valotusajan, valoisuuden, vahvistuksen ja terävyyden säätäminen kuvausolosuhteiden perusteella sopiviksi mahdollistettiin myös käyttöliittymässä.

Kameran asetuksia testatessa kävi ilmi, että oletus-valkotasapaino oli liikaa punaisen puolella. Tämä huomattiin, kun valkoista testivaloa kuvattiin kameralla, jolloin valo näkyi esikatseluikkunassa selkeästi punasävyisenä.

Valkoisen sektorin väri muuttuu selkeästi punaisemmaksi kuvassa säädettäessä tarkennusta huonommaksi. Tämä johtuu kromaattisesta aberratiosta, eli valon eri aallonpituuksien erisuuruudesta taittumisesta linssissä. [19] Tällöin eri väreillä on polttopiste eri etäisyyksillä ja valkoisen valon ympärille tulee reunoja kohti himmenevä punertava alue. Fokuksen säätäminen pois loistosta on kuitenkin hyödyllistä, koska tällöin loistopiste leviää useamman pikselin alueelle ja samalla sen intensiteetti pienenee, jolloin välttyään RGB-komponenttien saturoitumiselta. Hieman suuremman valopisteen seuraaminen näytöllä kuvauksen aikana on myös helpompaa kuin hyvin pienen pisteen.

Fokuksen lisäksi muut objektiivista säädettävät ominaisuudet ovat zoomaus ja aukon koko. Aukko pidettiin kuvauksissa koko ajan mahdollisimman suurena, koska kuvaukset tehtiin aina pimeällä. Zoomausta oli mahdollista käyttää, jos aallokko oli hyvin pientä. Zoomaus selkeytti loiston väriä kuvassa, joten sitä käytettiin kuvauksissa mahdollisuuksien mukaan.

Asetuksia ei kuitenkaan voi lukita paikoilleen vaan niitä on säädettävä kuvattavan loiston kirkkauden mukaan. Suuri valotusaika ja loiston suurentaminen ja himmentäminen tarkennusta säätämällä voivat olla toimivat kuvausasetukset jollakin loistolla, mutta himmeämpää loistoa kuvattaessa tarkennusta on säädettävä paremmaksi, jotta valoa kertyy riittävästi kennolle.

Kuvauksen asetukset

Kun kuvat on asetettu tulemaan oikeassa muodossa oikean näköisenä, on päätettävä kuvauksen liipaisu ja kuvien tallentamiseen liittyvät seikat. Kameran kuvien päivitystaajuus on asetettavissa välille 3,75-15 Hz. Korkein taajuus ei ole välttämätön jokaista loistoa kuvattaessa, koska veneellä ajetaan hyvin hitaasti, noin nopeudella 1-2 solmua (1 solmu on 1,852 km/h), joten 1/15 sekunnin aikana vene ehtii liikkua vain 3,4–6,9 cm. Tämä on enemmän kuin tarvittava tarkkuus värirajojen paikannuksessa. GPS-vastaanotin ei pysty määrittämään paikkaa näin suurella tarkkuudella, joten pienempikin tarkkuus riittää. Kuitenkin joissakin loistoissa valon välähdys näkyy vain 0,15 sekunnin ajan, minkä takia suuri päivitysnopeus on tarpeellinen. [3] Suuri päivitysnopeus on tarpeellinen myös siksi, että sen avulla yhden loiston välähdyksen ajalta saadaan monta kuvaa. Tällöin loiston värikanavien arvoja keskiarvotettaessa yhden välähdyksen ajalta saadaan luotettavampi tulos. Näytteet yhden välähdyksen ajalta keskiarvotetaan, koska loiston intensiteetit vaihtelevat melko paljon sen sammussa ja syttyessä.

Liipaisuun liittyviä asetuksia pitää myös säätää halutuiksi ennen kuvauksen aloittamista. Liipaisuun tilaksi säädetään *immediate*, joka tarkoittaa sitä, että *start*-käskyn tultua ohjelmassa vastaan, kamera liipaisee välittömästi ja kaappaa ennalta määrätyn määrän kuvia määritetyllä kuvaustaajuudella. Välitön liipaisu otettiin käyttöön testausten jälkeen, koska se oli nopein tapa tallentaa kuvia. Kuvien kaappausmääräksi asetettiin ääretön, jolloin kuvien kaappaus

loppuu vasta erillisellä *stop*-käskyllä. [20] Käyttäjä saa käyttöliittymän painonapilla päättää, milloin aloittaa ja milloin lopettaa kuvaamisen.

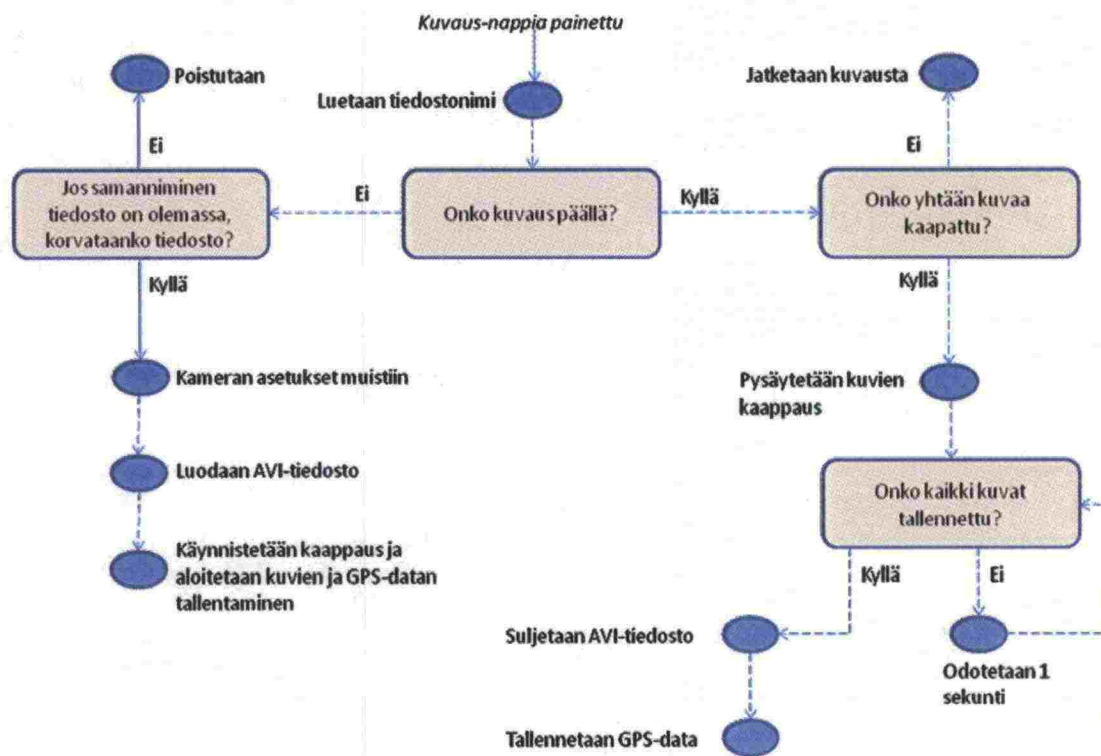
MATLAB:n suorituskky oli aluksi ongelma kuvia tallennettaessa, koska yksittäisen kuvan tallentaminen kovalevylle *imwrite*-komennolla vei enemmän aikaa kuin kameran kuvan kaappaus. Tämä sai aikaan sen, että kameran kuvapuskuri täyttyi melko nopeasti ja esikatselu hidastui, koska kuvan tallentaminen vei suurimman osan prosessoriajasta. Lisäksi kuvankaappaus-funktio oli non-blocking-operaatio, eli se palautti ohjelman suorituksen välittömästi seuraavaan käskyyn, vaikka uusi kuvakehys ei olisi vielä saatavilla. Tämä sai aikaan sen, että, kuvaa yritettiin tallentaa, vaikka sitä ei ollut vielä tullut. Toisena huonona vaihtoehtona oli se, että funktio palautti kuvan, mutta se oli sama kuin viimeksi haettu kuva. MATLAB:ssa on mahdollista tehdä uusimman kuvan hakemisen blocking-operaationa, mutta nämä funktiot olivat liian hitaita reaaliaikaiseen kuvien hakemiseen, niiden näyttämiseen ja tallentamiseen. Testatut kuvankaappaus-funktiot olivat *peekdata* (non-blocking), *getdata* (blocking) ja *getsnapshot* (blocking). [20]

Tallennettuja kuvia ei missään vaiheessa voinut tuoda MATLAB-työmuistiin niiden suuren määrän ja yksittäisen kuvan koon takia. MATLAB kuluttaisi tietokoneen muistia aivan liikaa, jos kuvia tallennettaisiin sen työpöydälle kuvauksen edetessä. Kuvien tallentaminen raakakuvina olisi varmasti nopeuttanut tallennusta, mutta tällöin erikseen vaadittava väri-interpolointi RGB-kuvaksi esikatselua varten ei olisi myöskään ollut nopea toteutustapa. Tämä olisi lisäksi hidastanut värintunnistusalgoritmin toimintaa, kun jokainen raakakuva olisi pitänyt interpoloida kuvankäsittelyä varten.

Näiden tekijöiden takia hyvä ratkaisu oli tallentaa kuvat AVI-muotoisena. Videotiedoston alustuksen jälkeen MATLAB lisäsi uusimman kuvan automaattisesti videotiedostoon, kun kaappaus laitettiin päälle. AVI-muotoisena tallennettaessa esikatselu-kuva päivittyi riittävän nopeasti ja MATLAB:in muistinkulutus pysyi riittävän alhaisena. Esikatselu päivittyi pehmeästi tätä ratkaisua käyttäen, koska tekemällä MATLAB:issa *videoinput*-objektin ja määrittämällä sen tallentamaan kameralta saapuvat kuvakehykset automaattisesti omaan tahtiinsa kovalevylle, saatiin koko operaatio non-blocking-muotoon. [20] Kuvia tallennettaessa erikseen silmukassa MATLAB jäi aina odottamaan tallennusfunktion loppumista, ja tämän aikana esikatselu-kuvaa ei voitu päivittää.

Kuitenkin tämäkään ratkaisu ei ollut ongelmaton, koska MATLAB pystyy tekemään korkeintaan 2 Gigatavun kokoisen videotiedoston korruptoimatta sitä. Pakkaamattomia värikuvia tallennettaessa tämä raja tuli resoluutiosta riippuen noin kahden minuutin kohdalla vastaan, joten kuvien kompressointi tuli aiheelliseksi. MATLAB tukee värikuvien pakkaamiseen vain kolmea koodekkia: Indeo3, Indeo5 ja Cinepak. Näistä kaksi jälkimmäistä olivat liian hitaita reaaliaikaiseen kuvien tallentamiseen, joten jäljelle jäi vain Indeo3. Indeo3-koodekillä loistojen väriarvot pysyivät riittävän samankaltaisina kuin ilman kompressointia, joten sen käyttö oli mahdollista.

Kuvaus etenee algoritmissa kuvan 19 mukaisesti. Algoritmi on yksinkertainen, periaatteessa kaappaus käynnistetään ensimmäisellä napin painalluksella ja toisella se lopetetaan. Kuvauksen ollessa käynnissä tallennetaan myös GPS-dataa. Kuvausta lopettaessa tarkistetaan, että onko kuvaus niin lyhyt, että yhtään kuvaa ei ole kaapattu. Jos näin on, ei lopeteta kuvausta. Kaappauksen pysäyttämisen jälkeen odotetaan, että kaikki kuvat saadaan tallennettua ennen AVI-tiedoston paketoimista.



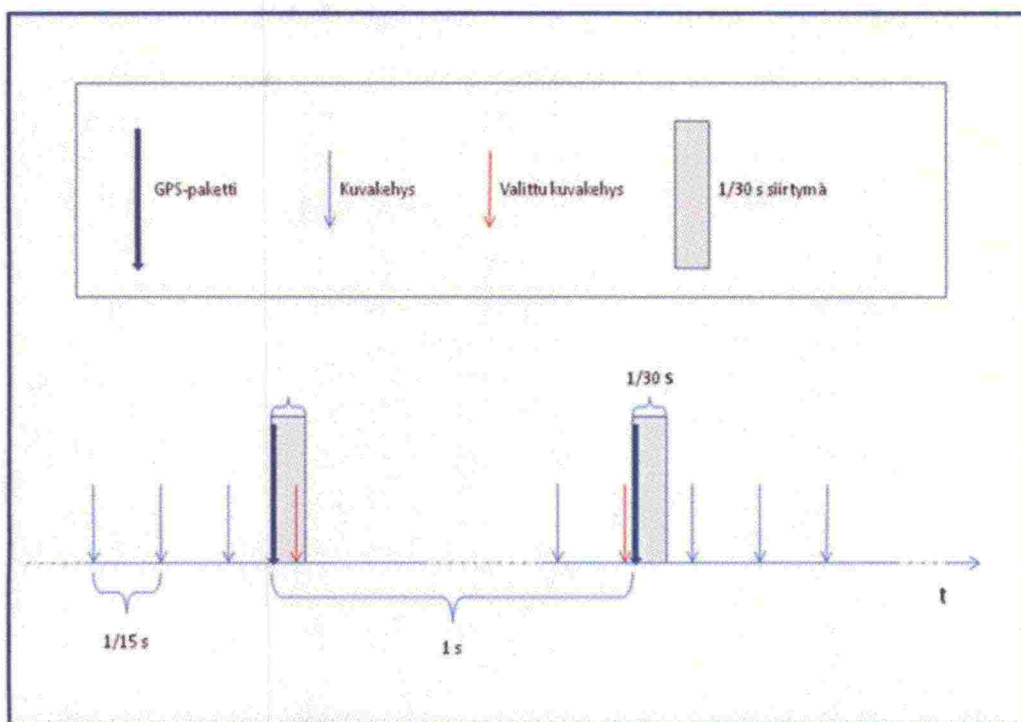
Kuva 19: Kuvaus

GPS-datan käsittely

Kuten luvussa 3.1 kerrottiin, vastaanottaa Garmin 18 LVC monia erilaisia paketteja, jos niin halutaan. GPS-datan käsittely saadaan kuitenkin yksinkertaisemmaksi lähettämällä vastaanottimelle signaali, jonka avulla muiden kuin GPGLA-paketin vastaanottaminen kytketään pois päältä. Käyttöliittymän käynnistyessä sarjaporttiin luodaan yhteys, mutta GPS-koordinaatteja tallennetaan vasta sitten, kun kuvaaminen aloitetaan.

GPS-datan synkronointi

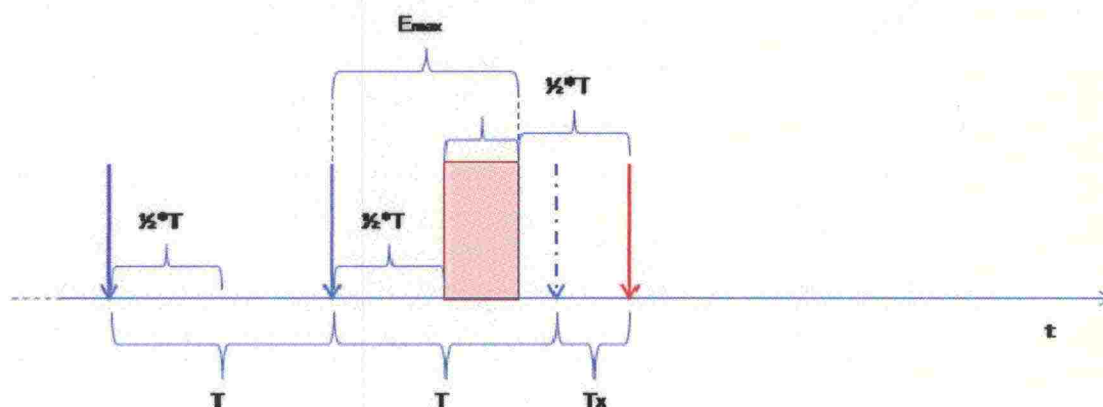
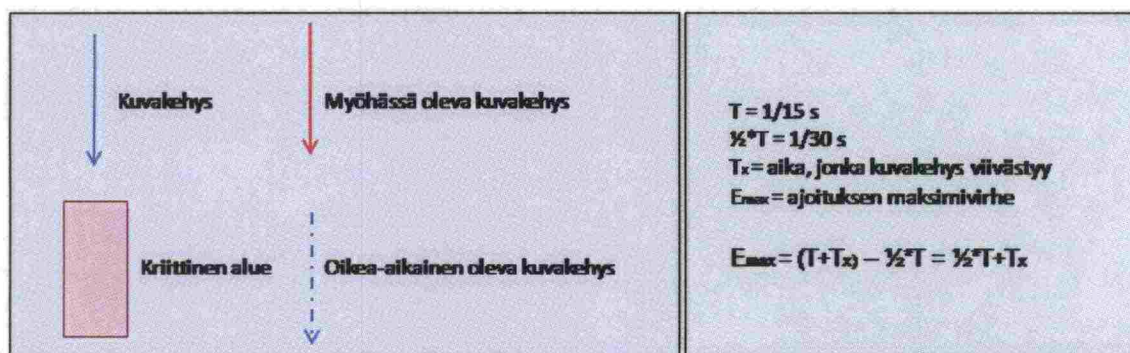
GPGLA-paketti saapuu kerran sekunnissa ja kuvadataa tulee 15 Hz taajuudella. Nämä tulee synkronoida siten, että saapuvaan GPS-pakettiin merkitään sen kuvakehyksen numero, joka on kaapattu ajallisesti lähinnä GPS-paketin lukemista. GPS-data saadaan synkronoitua lähimpään kuvakehykseen siten, että paketin saapuessa odotetaan 1/30 sekuntia, eli puolet kuvan päivitystaajuudesta. Paketteja vastaanottaessa pitää ottaa huomioon se, milloin paketin saapuminen huomiodaan. Koska GPS-pakettia aletaan lukea vasta, kun se on kokonaan saapunut, pitää sen saapumiseen kuluva aika ottaa myös huomioon. Lähetyksenopeuden ollessa 4800 baudia ja GPGLA-paketin pituuden ollessa 82 merkkiä, kuluu paketin ensimmäisen ja viimeisen merkin saapumisen välillä $82/4800 = 0,0171$ sekuntia. GPS-vastaanottimen koordinaattien laskentaan kuluva aika eri satelliittien signaaliviiveistä jätettiin laskuissa huomioita. Näin ollen odotettava aika onkin $1/30 - 82/4800 = 0,01625$ sekuntia. Tämän jälkeen vasta otetaan talteen senhetkisen kuvan numero. Jos odotusaikana on ehtinyt saapua uusi kuva, oltiin GPS-datan saapuessa ajallisesti lähempänä seuraavaa kuvaa kuin sitä ennen kaapattua kuvaa. Kuva 20 selventää tilannetta.



Kuva 20: Kuvien ja GPS-pakettien synkronointi

Näin ollen ajoitusvirhe kuvien ja GPS-datan välillä vaihtelee välillä $-1/30 \dots 1/30$ sekuntia, jos kuvien kaappaus ja käsittely tapahtuu vakionopeudella. Käytännössä kuvien kaappaus ei tapahdu tarkasti 15 Hertzin taajuudella, jolloin tasan $1/30$ sekunnin odotusaika ei aina vastaa puolta kuvan päivitysvälistä. Kaappauksen hidastuessa saattaa ajoitusvirhe kasvaa. Kuvassa 21 on esitetty tilanne, jossa kaappaus on hidastunut. Tällöin ajoituksen maksimivirhe voi olla suurempi kuin $1/30$ sekuntia, jos GPS-paketti luetaan kuvassa nähdyn kriittisen alueen aikana. Tämän alueen aikana on kulunut yli $1/30$ sekuntia edellisestä kaapatusta kuvasta ja hidastumisesta johtuen aikaa kuluu yli $1/30$ sekuntia seuraavan kuvan kaappaamiseen. GPS-paketin saapuminen, kun ollaan ajallisesti kriittisen alueen lopussa, johtaa suurimpaan mahdolliseen ajoitusvirheeseen. Tällöin odotetaan $1/30$ sekuntia ja koska kuvakehystä ei saavu, merkitään GPS-paketti saapuneeksi edellisen kuvakehyksen aikana. Tämä virhe, E_{\max} , on suuruudeltaan normaalin maksimivirheen ja kuvakehyksen viivästymisen summa. $E_{\max} = \frac{1}{2} \cdot T + T_x$.

On huomioitava, että GPS-signaalin synkronoinnista johtuva virhe rajojen paikannuksessa on erittäin pieni. Käytännössä sillä ei ole tässä vaiheessa projektia mitään merkitystä, koska GPS-signaalin epätarkkuus voi olla 15 metrin luokkaa ja rajanhakualgoritmi keskiarvottaa loiston värin koko välähdyksen ajalta, jolloin data on ajallisesti melko epäspesifistä.



Kuva 21: Synkronoinnin maksimivirhe

Yksikön muuttaminen ja koordinaattien interpolointi

Leveys- ja pituusaste tulevat GPS-paketissa muodossa DDMM.mmmm, missä DD tarkoittaa asteita, MM minuutteja ja mmmm minuutin kymmenes-, sadas-, tuhannes- ja kymmenestuhannesosia. Koordinaatit on muutettava joko kkj- (karttakoordinaatistojärjestelmä) tai Euref-fin-koordinaatistoon Reimari-järjestelmää varten. kkj-koordinaatiston yksikkönä on metri ja Euref-fin-koordinaatiston yksikkö on aste. Muutetaan koordinaatit Euref-fin-muotoon, koska ne tulevat GPS-vastaanottimesta asteina. Euref-fin-koordinaatiston yksiköt ovat muotoa *aste:minuutti:sekunti.desimaalit*.

DDMM.mmmm- muotoisesta koordinaatista saadaan tämän yksikön muotoisia, kun 0,mmmm-osuus kerrotaan 60:llä. Tällöin esimerkiksi suurin mahdollinen desimaali 0,9999 tulee muotoon $0,9999 \cdot 60 = 59,994$, eli 59 sekuntia ja 994 tuhannesosaa.

Yksikön muuttaminen on kätevin tehdä vasta lopuksi, sen jälkeen kun GPS-data on interpoloitu niin, että jokaiselle kuvakehykselle on oma GPS-koordinaattinsa. Interpolointi on tehtävä, koska GPS-paketit saapuvat kerran sekunnissa ja kuvia saapuu 15 sekunnissa, kun kuvaus on päällä. Kun loiston väri raja tunnustetaan tietyllä kuvalla, pitää tällä kuvalla olla myös koordinaatti kertomaan paikka, jossa oltiin tätä kuvaa ottaessa. Yksikön muuttaminen tehdään interpoloinnin jälkeen, koska koordinaattipisteiden interpolointi kahden alkuperäisen koordinaatin väliin on helpointa tehdä, kun koordinaatit ovat kymmenkantaisessa muodossa. Tällöin koordinaattipisteiden väli on helposti ohjelmallisesti jaettavissa 15 yhtä suureen osaan, joille jokaiselle tulee interpoloitu koordinaatti. Interpolointi olisi vaivalloisempaa, jos jouduttaisiin käsittelemään koordinaatteja ddmm.ssss muotoisina, jonka minuutit ja sekunnit loppuisivat lukemaan 59 minuuttia 59,999 sekuntia.

Tämän takia alkuperäinen yksikkö DDMM.mmmm muutetaan muotoon DDdd.dddd, eli asteiksi ja asteiden desimaaleiksi. Minuuteista ja niiden desimaaleista saadaan asteiden desimaaleja jakamalla ne 60:llä, joten $DD:dd.dddd=DD:(mm.mmmm)/60$.

Kuvankäsittely

Kuvattujen videoiden käsittely sektorirajojen löytämiseksi voidaan jakaa kahteen pääosaan: loiston etsiminen kuvista ja sen RGB-arvojen tallentaminen sekä värirajojen etsiminen RGB-arvojen perusteella. Suurin osa ohjelman suoritusajasta kuluu loistopisteen etsimisessä kuvakehyksistä. Sektorivalon keskiarvotetut RGB-arvot tallennetaan vektoreihin. Sektorien vaihtumiskohdat etsitään näiden vektorien perusteella. Kuvankäsittelyn tärkeimpien MATLAB-funktioiden esittelyt ovat liitteessä 2.

Loistopisteen tunnistus

Loiston etsiminen kuvista tehdään silmukassa kuva kerrallaan. Loiston tunnistamiseen kuvan muiden valonlähteiden joukosta käytetään tietoja edellisestä kuvasta löydetyn loiston ominaisuuksista sekä loiston valotunnusta.

Ensimmäisen kuvan käsittely

Ensimmäinen kuva käsitellään erikseen, koska tunnistuksen alkaessa ei vielä tiedetä mitään kuvattun loiston ominaisuuksista. Loistopiste paikannetaan kuvasta siten, että käyttäjän painaessa OK-nappia, haetaan sillä hetkellä näytöllä näkyvän kuvan se piste, jossa on kuvan maksimiarvo. Ennen maksimiarvon hakemista kuvan R-,G- ja B-komponentit ovat summattu yhteen. Oletusarvoisesti kuvan kirkkain piste on jokin loistopisteen keskellä olevista pikseleistä, ja jos näin ei ole, on käyttäjän tehtävänä ensin rajata kuvasta muut valonlähteet pois käyttäen käyttöliittymän *zoom*-toimintoa.

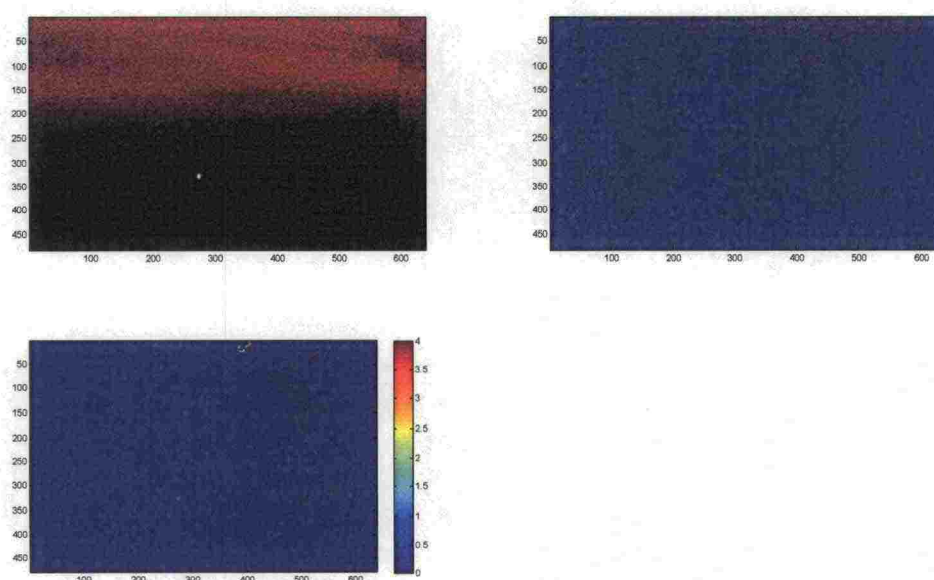
Jos tallennetuissa kuvissa on käytetty suurta vahvistusta ja/tai valoisuutta, jotta valokenno rekisteröisi himmeän sektorivalon, on kuvissa myös kohinaa. Ylimääräiset kohteet poistetaan kynnystämällä kuvasta tiettyä intensiteettiä pienemmät arvot pois, minkä jälkeen kynnystetystä kuvasta poistetaan pikselimäärältään tiettyä raja-arvoa pienemmät kohteet morfologisella avaamisoperaatiolla. Samaksi kohteeksi lasketaan ne pikselit, jotka ovat yhteydessä toisiinsa niiden 8-naapurustossa.

Kynnystysarvo valitaan loiston keskipisteen ympäristön pikseleiden arvojen perusteella. Aluksi loiston keskipisteen ympäriltä lasketaan noin sadan pikselin alueelta pikselien keskiarvo, joka otetaan alustavasti kynnysarvoksi. Loistopisteen ympäristö kynnystetään tällä arvolla, ja ensimmäiseksi morfologisen avaamisen raja-arvoksi otetaan jäljellä olevien nollasta poikkeavien pikselien määrä tällä sadan pikselin alueella. Tämän jälkeen molemmat arvot on tarkistettava, jotta esikäsittelyn jälkeen kuvassa on mahdollisimman vähän muita nollasta poikkeavia pikseleitä loiston lisäksi. Avaamisen raja-arvo tarkistetaan aluksi siten, että tehdään avaamisoperaatio ensimmäiselle kuvalle ja katsotaan onko ennalta tiedetyn keskipisteen kohdalla nolla vai muu arvo. Raja-arvoa pienennetään niin kauan, kunnes keskipisteen kohdalla on valoisa pikseli. Kynnysarvo tarkistetaan siten, että lasketaan

kynnysarvolla maskattuun kuvaan jääneiden kohteiden lukumäärä, ja nostetaan kynnystystä kunnes kuvassa on riittävän pieni määrä valonlähteitä.

Taustavalon ollessa voimakas ei sektorivalo välttämättä erotu taustasta riittävästi, jolloin käytetty kohteiden luokittelufunktio *bwlabel* tunnistaa taustan ja sektorivalon yhtenä kohteena. Tämän välttämiseksi lähinnä käyttäjän osoittamaa pistettä olevan kohteen pinta-ala lasketaan ja nostetaan kynnystystä, kunnes se on riittävän pieni. Nämä molemmat tarkistukset perustuvat siihen, että sektoriloiston intensiteetti on korkeampi kuin taustavalon.

Kuvassa 22 on esimerkkikuva loiston kuvauksesta, vasemmassa yläreunassa on alkuperäinen kuva videosta, oikeassa yläreunassa on maski kynnystämisen jälkeen ja alhaalla numeroitu maski avaamisoperaation jälkeen. Alkuperäisessä kuvassa näkyy selvästi pimenevä taivas sekä loisto. Ensimmäisessä maskissa suurin osa taivaasta on kynnystetty pois, mutta sen yläreunaan on jäänyt joitakin ykkösiä. Toisessa maskissa on yhteensä neljä erillistä klusteria, joiden joukosta loistopiste on helppo erottaa sen korkean intensiteetin ja paikan takia.



Kuva 22: Taustavalon poistetaan kuvasta ensin kynnystämällä, jonka jälkeen pienikokoiset kohteet poistetaan morfologisella avaamisoperaatiolla

Kuvien esikäsittely

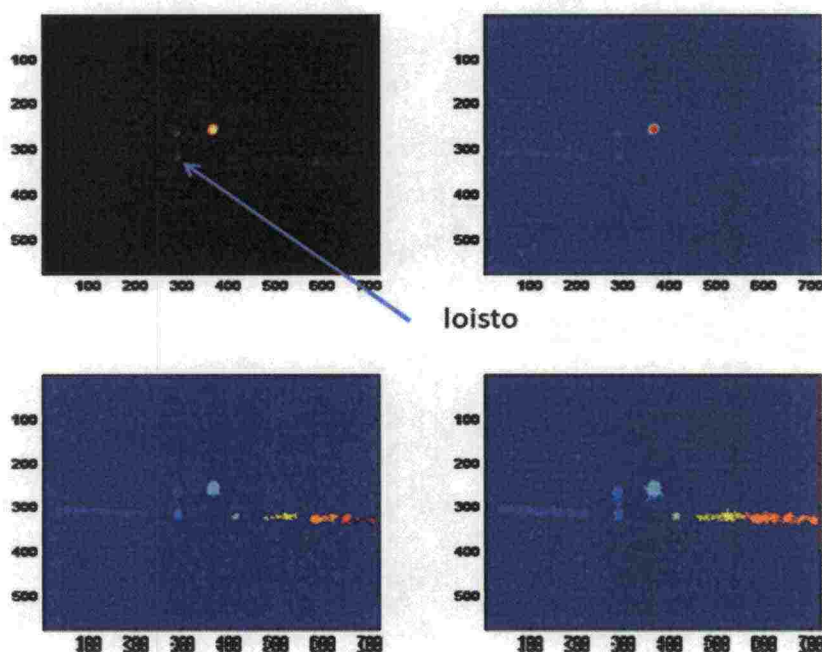
Ennen loistopisteen tunnistamista kuvasta ja pisteen väriarvojen analysointia pitää turhat valonlähteet ja kohina poistaa kuvasta. Optimitalanteessa kuvassa ei ole kohinaa ja kuvan ainoa valonlähde on sektorivalo, mutta muihinkin tilanteisiin on varauduttava. Ensimmäinen kynnysarvo ja morfologisen avaamisoperaation käyttämä poistettavien kohteiden maksimikoko lasketaan ensimmäisen käsiteltävän kuvan perusteella ja sen jälkeen molempia päivitetään ennen kuin uuteen kuvaan siirrytään.

Koska valkoisen valon intensiteetti on suurempi kuin punaisen ja vihreän, saattaa valkoisen sektorin kohdalla laskettu kynnysarvo kynnystää vihreän tai punaisen pois kuvasta. Kynnysarvon ollessa liian matala verrattuna kuvassa olevien valonlähteiden kirkkauteen, saattavat lähellä toisiaan olevat eri valonlähteet sekoittua toisiinsa ja näkyä yhtenä valonlähteenä. Tämä johtuu siitä, että yleensä valot ovat kirkkaimpia keskeltä ja himmenevät

kohti reunoja. Korkealla kynnystyksellä vain valojen kirkkain alue jää kuvaan maskauksen jälkeen ja valot erottuvat toisistaan.

Toinen seuraus liian pienestä kynnystysarvosta on se, että kun se lähestyy kuvan keskiarvoa, jää kuvaan enemmän kohteita kynnistyksen jälkeen. Tämä hidastaa algoritmia huomattavasti. Tavallisesti hyvin valitulla raja-arvolla on kohteiden lukumäärä kynnistyksen ja avaamisoperaation jälkeen alle kymmenen, yleensä kuvassa on esikäsittelyn jälkeen jäljellä vain loistopiste.

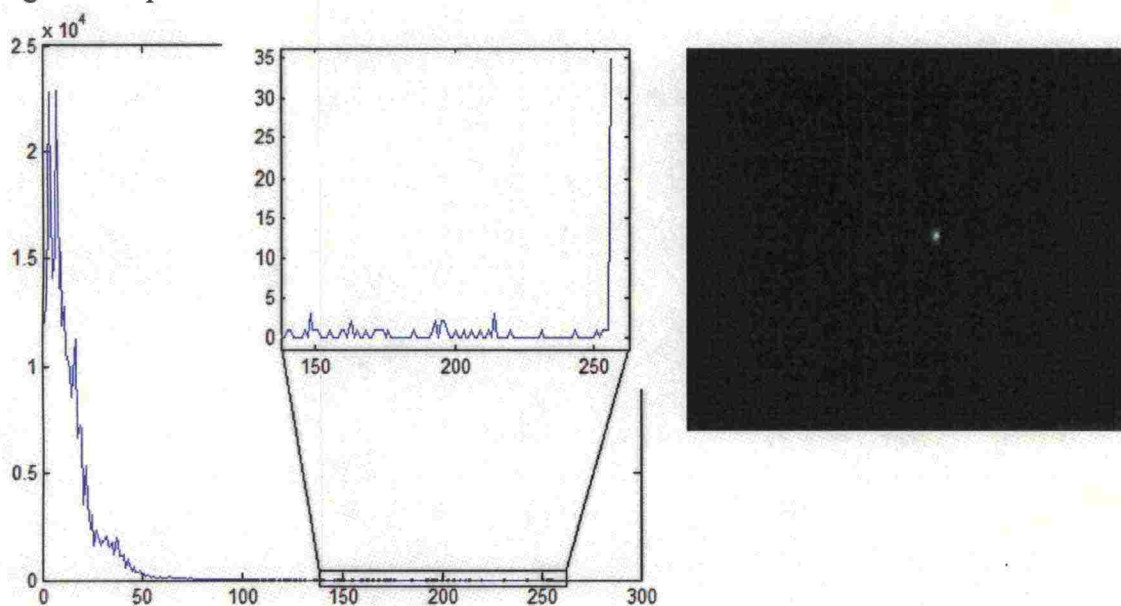
Kuvassa 23 on vasemmassa yläreunassa alkuperäinen kuva, jonka punainen piste noin koordinaateissa (300,300) on sektorivalo. Oikeassa yläreunassa on kuva, jossa alkuperäisen kuvan värikomponentit ovat summattu. Sektorivalo ja myös ylimääräiset kohteet erottuvat selvästi tästä kuvasta. Vasemmassa alareunassa on esitetty maski, joka on onnistunut erottamaan sektorivalopisteen muista valoista riittävän suurella kynnystyksellä. Eri kohteet on merkitty eri väreillä. Kun kynnystystä pienennetään hieman, kuten oikeassa alareunassa olevan kuvan tapauksessa on tehty, sekoittuvat sektorivalopiste ja sen yläpuolella oleva valo keskenään, jolloin sektoriloisto jää tunnistamatta, vaikka se vielä erottuu taustasta.



Kuva 23: Liian pieni kynnystysarvo aiheuttaa valonlähteiden toisiinsa sekoittumisen oikeassa alakuvassa. Vasemmassa alakuvassa loisto erottuu sen yläpuolella olevasta valonlähteestä.

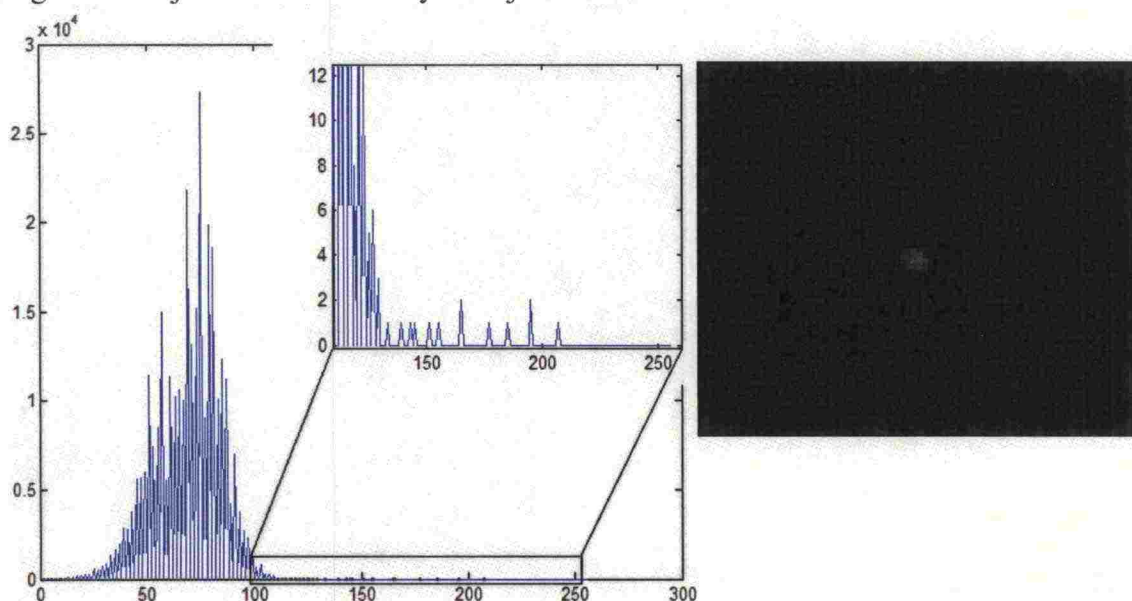
Kynnistyksen päivittäminen kuvankäsittelyalgoritmissa voidaan tehdä kahdella eri periaatteella riippuen taustavalonlähteistä, taustakohinan määrästä sekä loistopisteen koosta kuvassa. Kynnystysarvo voidaan valita jokaisessa kuvassa kuvan histogrammin perusteella, jos kuvauksessa ei ole taustavalonlähteitä, kohinataso on riittävän matala ja loiston koko on riittävän suuri. Kun käyttäjä on merkinnyt tunnistuksen alkaessa, että kuvauksessa ei ole muita valonlähteitä loiston lisäksi, tiedetään, että loisto on kuvan kirkkain pistejoukko. Tämän pistejoukon kirkkaus selviää kuvan histogrammin x-akselin oikeasta ääripäästä. Histogrammissa x-akselilla on intensiteetti ja y-akselilla pikselimäärä. Matala kohinataso aiheuttaa selkeämmän piikin histogrammiin. Loisto saattaa olla niin himmeä, että korkealla kohinatasolla se ei erotu histogrammista. Loistopisteen koko vaikuttaa myös kynnystysarvon valintaan histogrammin perusteella, koska mitä suurempi on loiston koko ja täten

avaamisoperaation raja-arvo, sitä epätodennäköisempää on, että kuvasta löytyy jokin loistovalon kokoinen suuri ja kirkas kohinaklusteri, jota ei maskata kynnystämällä tai morfologisella avauksella pois kuvasta. Melko matalallakin kohinatasolla kuvassa saattaa olla pieniä, alle 10 pikselin kokoisia kirkkaita kohina-alueita. Kynnystysarvon minimiarvo on 50. Vaikka histogrammista ei löytyisikään näin suurta arvoa, asetetaan kynnystys 50:een. Loisto saattaa sammuessaan näkyä tätä minimiä himmeämpänä, mutta kuvaan jäävien kohteiden määrä kynnistyksen jälkeen kasvaa merkittävästi kynnistyksen lähestyessä kuvan intensiteetin keskiarvoa. Kuvassa 24 on esitetty tapaus, jossa kynnystys voidaan tehdä histogrammin perusteella.



Kuva 24: Kynnystysarvon valinta histogrammin perusteella onnistuu, jos loisto erottuu selvästi kuvan muita pikseleitä kirkkaampana

Kuvassa 25 on esitetty histogrammi toisenlaisesta kuvauksesta, jossa loisto ei erotu histogrammista johtuen sen himmeydestä ja korkeammasta kohinatasosta.



Kuva 25: Kynnystysarvon valinta histogrammin perusteella ei onnistu loiston sekoittuessa taustakohinaan

Toisena vaihtoehtona kynnystysarvon päivittämiseksi on sen päivittäminen adaptiivisesti seuraten sektorivalon keski-intensiteettiä. Korkealla kohinatasolla tai jos kuvauksessa on taustavalonlähteitä, on tärkeää saada mahdollisimman suuri osa kohinasta kynnystettyä pois säilyttäen kuitenkin sektorivalo kuvassa. Tällöin kynnysarvon päivitys tehdään niin, että tarkastellaan nykyisen kehyksen löydetyn sektorivalon keskimääräisen intensiteetin suhdetta edellisen kehyksen vastaavaan. Koska sektorivalo usein sammuu hitaammin kuin syttyy, sen sammumisen jälkeen on kuvista havaittavissa jälkihehkua. Jos loiston sammussa kynnysarvoa pienennettäisiin liian nopeasti jälkihehkun intensiteetin perusteella, pienenis se lähelle kuvan pikselien keskiarvoa. Kynnysarvon on kuitenkin pysyttävä mukana loiston intensiteetin muutoksissa siirryttäessä sektorirajojen yli. Arvoa päivitetään seuraavalla säännöllä:

$$Kynnystys_{i+1} = Kynnystys_i \cdot \frac{\sqrt{Intensiteetti_i}}{\sqrt{Intensiteetti_{i-1}}} \quad (6)$$

missä $Intensiteetti_i$ on loistovalon keskimääräinen intensiteetti kuvakehyksessä i .

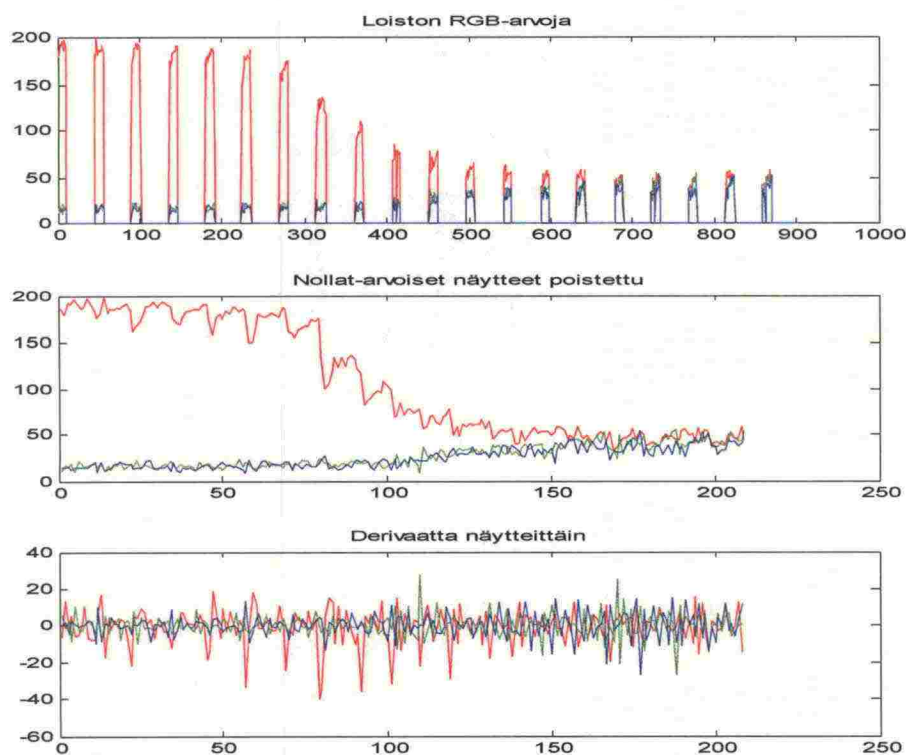
Arvoa joudutaan päivityksen jälkeen tarkistamaan vertaamalla sitä kuvan pikselien keskiarvoon sekä edellisen kehyksen loistopisteen kokoon. Loistopisteen pieni koko kertoo siitä, että vain sen kirkkain alue on jäänyt jäljelle, jolloin kynnystystä lasketaan. Syynä kahdelle metodille kynnystyksen päivittämiseksi on se, että jälkimmäisenä kuvattu tapa saattaa johtaa liian suureen kynnystysarvoon, jolloin loisto maskautuu pois kuvasta. Tämä johtuu siitä, että kynnystysarvo lasketaan seuraavalle kuvalle edellisen kuvan loiston intensiteetin perusteella. Tällöin on mahdollista, että kynnystys on liian suuri seuraavan kuvan loistovalolle. Loistoilla, joilla valon intensiteetti pienenee erittäin nopeasti sektorirajalla, voidaan loisto maskata ulos kuvasta. Tämän takia kynnystyksen maksimiarvo on 200 kuvan keskiarvon ollessa alle 50 ja taustavalojen lukumäärän ollessa alle 5. Taustavalojen lukumäärän ollessa yli 5, ei kynnystykselle anneta maksimirajaa, jotta mahdollisimman suuri osa taustavaloista saadaan kynnystettyä pois kuvasta.

Avaamisen raja-arvo päivitetään niin, että seuraavalle kuvakehykselle se on nykyisen kuvakehyksen löydetyn loistopisteen koko jaettuna kahdella. Loistopisteen koko ja suurin osa sen muistakin ominaisuuksista, joita loistopisteen erottamiseen muista kohteista käytetään, saadaan MATLAB:in *Regionprops*-funktioista. Alkuperäistä *Regionprops*-funktioita nopeutettiin hieman, koska sitä kutsutaan useasti ja se oli alun perin hitaampi suorittaa. Raja-arvon pitää olla hieman pienempi kuin *Regionprops*-funktion ilmoittama kohteen koko, koska MATLAB:in morfologisen avaamisen tekemä *Bwareaopen* painottaa toisissaan kiinni olevia pikseleitä toisella tavalla, minkä takia nämä funktiot ilmoittavat samalle kuvan valonlähteelle erilaisen koon. Jos *Regionprops*-funktion ilmoittamaa loistovalon pikselimäärää käytettäisiin suoraan morfologisen avaamisoperaation parametrina, poistettaisiin loistovalon kokoiset kohteet kuvasta.[21]

Näiden kahden esikäsittelyoperaation jälkeen kuvassa jäljellä olevat erilliset klusterit numeroidaan ja jokaisen klusterin muutamia ominaisuuksia lasketaan valopisteiden toisistaan erottamista varten. Laskettavat ominaisuudet ovat valopisteen pikselimäärä, keskipisteen koordinaatti, primaari- ja sekundaariakseleiden pituudet sekä R- G- ja B-kanavien keskiarvot. Muita näistä ominaisuuksista käytetään vertailussa sellaisenaan, mutta valopisteen muotoa kuvaamaan käytetään primaariakselin pituuden suhdetta sekundaariakselin akselin pituuteen.

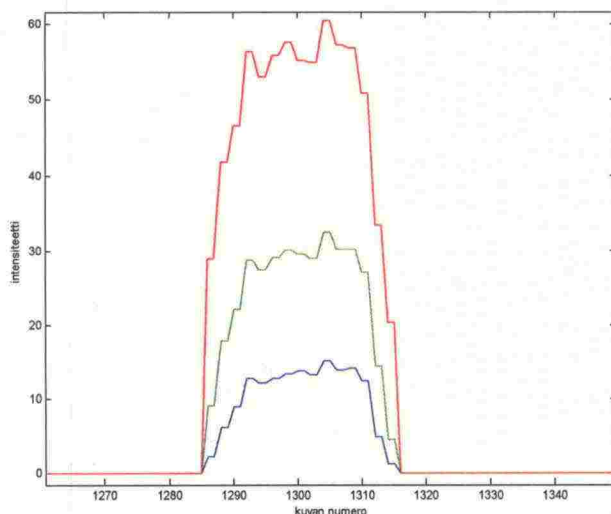
Loistopisteen hakeminen peräkkäisistä kuvista

Loistopisteen luotettavaa tunnistamista peräkkäisistä kuvista vaikeuttaa moni eri asia. Ensinnäkin loiston värikanavien intensiteetit vaihtelevat hyvin paljon, minkä takia loistopiste ei löydy luotettavasti kuvan muiden valonlähteiden joukosta vain väriarvoja tarkastelemalla. Kuvassa 26 näkyy kuinka punaisen, vihreän ja sinisen kanavan väriarvot vaihtelevat kuvattaessa yhtäjaksoisesti sektorivaloa sektorien vaihtumiskohdissa. Kuvan kohdassa ollaan siirtymässä punaiselta sektorilta vihreälle. Ylimmästä kuvaajasta nähdään, että loisto on palanut kuvaushetkellä sykkien, koska siinä on tasavälisesti nollakohtia niiden kuvien kohdalla, jossa valo on ollut pois päältä. Keskimmäisessä kuvaajassa nolla-arvoiset näytteet on poistettu. Alimmassa kuvaajassa on laskettu derivaatan diskreetti approksimaatio keskimmäisen kuvaajan vektoreille. Siitä nähdään kuinka paljon peräkkäisten näytteiden arvot vaihtelevat. Korkeimmillaan kahden peräkkäisen näytteen erotus punaisella värikanavalla on 40 yksikköä. Tällainen ero loiston keskimääräisessä intensiteetissä kahdella peräkkäisellä nollasta poikkeavalla näytteellä voi olla silloin, kun loisto pimenee näytteiden välillä. 20 yksikön erot loiston intensiteetissä kaikilla värikanavilla ennen ja jälkeen pimennyksen ovat tavallisia. Kun 255 on pikselin maksimiarvo, tarkoittaa 40 yksikön ero 15 prosenttia koko käytössä olevasta dynamiikasta. Tällaiselle vaihteluvälille sopivat usein taustavalojenkin RGB-arvot, joten loiston tunnistus ei voi perustua pelkästään niiden seuraamiseen. Tapahtumisaikaa suurelle muutokselle väriarvoissa ei voida ennustaa.



Kuva 26: Loiston RGB-arvojen muutos näytteiden välillä

Kuvassa 27 on kanavien väriarvot yhden välähdyksen ajalta. Siitä nähdään, että intensiteetit vaihtelevat paljon myös yksittäisen välähdyksen aikana. Valon syttyessä ja sammuesssa sen mitattu intensiteetti on pienempi kuin välähdyksen puolivälissä, kuten luonnolliselta tuntuukin. Kuitenkin tämäkin vaikeuttaa valonlähteiden rajaamista kuvasta väriarvojen perusteella, koska kahdessa peräkkäisessä kuvakehyksessä sektoriloiston värikanavan intensiteetti voi vaihdella yli 10 yksikköä jokaisella värikanavalla.



Kuva 27: Väriarvot loiston yhden välähdyksen ajalta

Loistopisteen koko vaihtelee melko paljon, kun loisto palaa välähdyksittäin. Valon kuvakennolle tuleva pinta-ala on suurimmillaan sen palaessa täydellä teholla ja pienempi sen syttyessä ja sammussa. Myös valon muoto muuttuu välähdyksittäin palaessa. Täydellä teholla palaessa loistovalo on melko pyöreä, mutta muissa vaiheissa muoto on epäsäännöllisempi. Muotoon vaikuttavat enemmän kuitenkin kameran äkilliset liikkeet kuvattaessa yli 50 millisekunnin valotusajalla. Asettamalla terävyyden huonommaksi muuttuu valo muodoltaan pyöreämmäksi. Huonona puolena on se, että usein myös muut merkkivalot, joita sektoriloiston ympärillä on ja jotka kuvataan, ovat myös muodoltaan melko pyöreitä. Joten sektorivalon pyöreää muotoa ei voida pitää luotettavana piirteenä sen tunnistamisessa kuvista.

Valopisteiden kokoon ja keskimääräiseen intensiteettiin vaikuttavat myös käytetyn kynnysarvon suuruus. Koska valonlähteen intensiteetti on suurin sen keskellä ja pienenee mentäessä kohti reunoja etenkin polttopisteen ollessa eri etäisyydellä kuin loisto, voi kynnysarvo vaikuttaa kohteiden kokoon.

Loistopisteen sijainti kuvassa vaihtelee melko paljon, koska kamera asetetaan paikalleen kuvattaessa ja aallokosta johtuen kamera heiluu pystysuunnassa. Kuvaustaajuuden ollessa 15 Hertzin luokkaa, ei valopiste siirry paljoa peräkkäisten kuvien välillä, jolloin pisteen seuraaminen peräkkäisissä kuvissa on melko yksinkertaista. Loistoa etsiessä pidetäänkin kirjaa siitä, onko se löytynyt edellisestä kuvakehyksestä. Jos se on löytynyt, etsitään vain viime loiston sijainnin lähietäisyydeltä ja hyväksytään loistoksi se valo, jonka RGB-arvot ovat lähimpänä viime kehyksen loiston arvoja. Yleensä loisto on ainoa valonlähde tällä hyvin rajatulla etsintäalueella.

Haastavampi tapaus on löytää loistovalo uudelleen sammumisen jälkeen, koska tällöin loisto saattaa syttyä aivan eri kohdassa kuvaa kuin jossa se viimeksi ennen sammumistaan oli ja vielä erivärisenä kuin viimeksi.

Loistopistettä voidaan etsiä kuvasta tarkistamalla sen värikanavien intensiteetit, niiden suhde toisiinsa, kohteen koko, muoto ja paikka ja vertaamalla näitä ominaisuuksia edelliseen löydettyyn loistopisteeseen. Tällä tavoin saadaan rajattua joitakin kohteita kuvasta, mutta

täyttä varmuutta ei näillä tarkistuksilla saada johtuen loiston ominaisuuksien suuresta vaihtelusta. Taulukossa 4 on merkitty kaikki valonlähteen ominaisuudet ja niiden vaihteluvälit, joiden avulla valo tunnistetaan sektorivaloksi tai muuksi kohteeksi. Seuraavassa luvussa kerrotaan taustavalojen käsittelystä, jolla poistetaan aiemmin havaittuja taustavaloja kuvasta ennen kuin loistoa ruvetaan etsimään kuvan valonlähteiden joukosta. Huomautettakoon, että seuraavan taulukon ominaisuuksien tarkastelu tehdään vain silloin, kun loistoa etsitään pimennyksen jälkeen.

Taulukko 4: Loiston etsinnässä käytetyt ominaisuudet

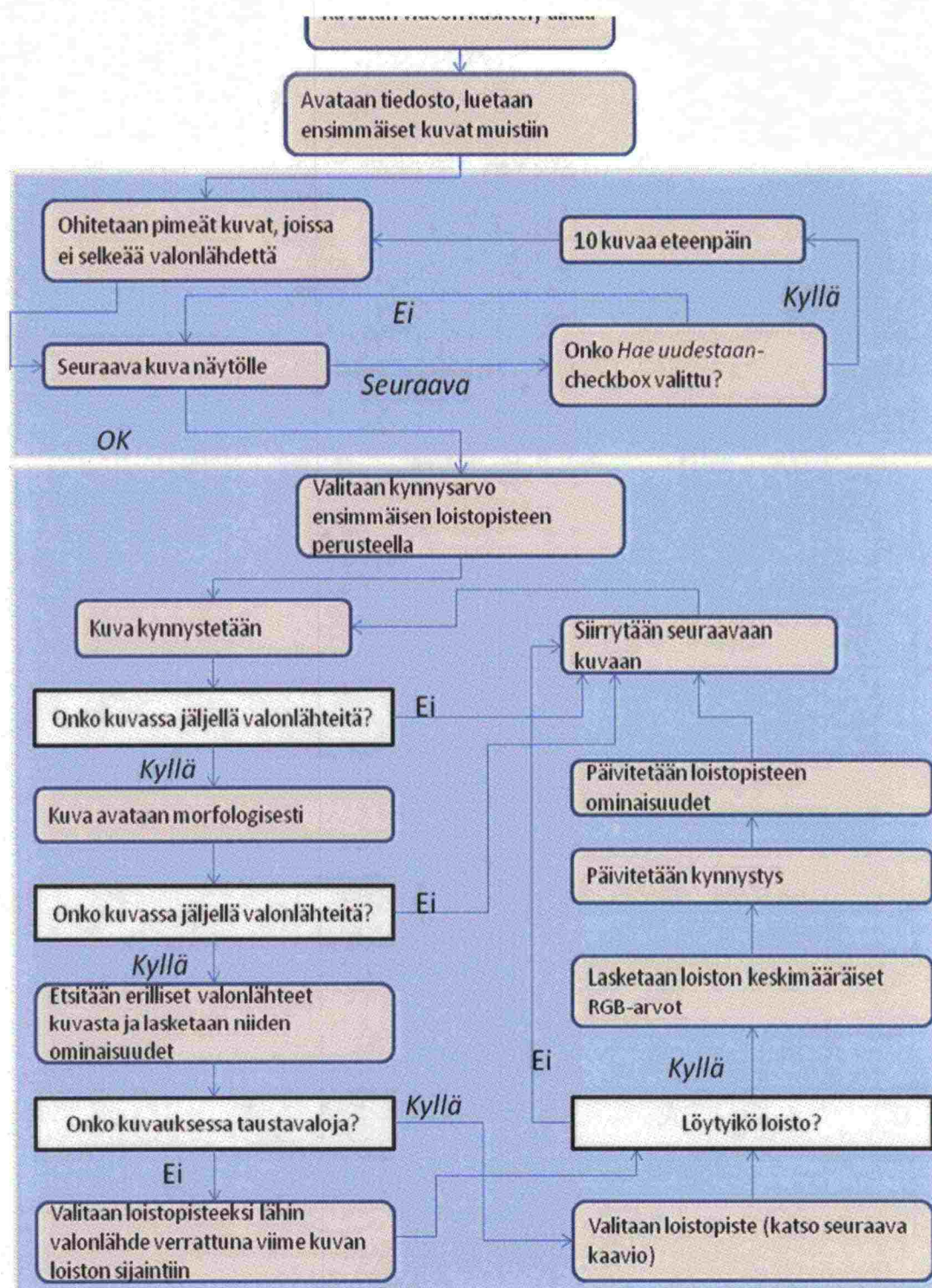
Ominaisuus	Hyväksyttävä muutos
Akselien suhteiden muutos*	< 0,6
Pinta-alan muutos**	0,5-2
$\frac{R_n}{R_{n-1}}, \frac{G_n}{G_{n-1}}, \frac{B_n}{B_{n-1}}$	0,333-3
$ R_n - R_{n-1} , G_n - G_{n-1} , B_n - B_{n-1} $	< 35
$\frac{R_{n-1}/B_{n-1}}{R_n/B_n}, \frac{G_{n-1}/B_{n-1}}{G_n/B_n}, \frac{R_{n-1}/G_{n-1}}{R_n/G_n}$	0,6-1,67
Peräkkäisten näytteiden lkm, jossa loistoa ei ole löytynyt	>=1,2*pimennysaika

*Akselien suhteiden muutos= $\left(\sum_{i=n-5}^{n-1} \frac{\text{prim.akselinpituus}_i}{\text{sek.akselinpituus}_i}\right) \cdot \frac{1}{5} - \frac{\text{prim.akselinpituus}_n}{\text{sek.akselinpituus}_n}$, (7)

missä n on uusimman kehyksen numero.

**Pinta-alan muutos = $\frac{\left(\sum_{i=n-5}^{n-1} ala_i\right) \cdot \frac{1}{5}}{ala_n}$, (8)

Loiston valotunnus voidaan tunnistaa algoritmissa muutaman ensimmäisen välähdysjakson perusteella laskemalla peräkkäisten näytteiden lukumääriä, joista loisto löytyy ja peräkkäisten näytteiden lukumääriä, joista loisto ei löydy. Näin saadaan keskimääräiset palamisaika ja pimennysaika. On huomioitava, että valotunnus voi olla monimutkaisempi kahdella eripituisella pimennysajalla. Tällöin lasketaan vain lyhyempi pimennysaika, jonka loisto on varmasti sammuneena. Palamisaika ja pimennysaika voidaan myös kertoa etukäteen, jolloin sitä ei lasketa ensimmäisten välähdysten perusteella kuvia käsitellessä. Kuvassa 28 on kuvattu päävaiheet loistonetsintäalgoritmista.



Kuva 28: Loiston etsintäalgoritmi

Taustavalon käsittely

Loiston ominaisuuksien suuren vaihtelun takia algoritmi pitää kirjata myös taustavalo-kohteista. Taustavalon huomioon ottaminen voidaan tehdä algoritmissa kahdella tavalla, yksinkertaisimmassa tapauksessa kuvaus on tehty pimeässä ja muita valonlähteitä ei ole. Tällöin koko sektorinloiston etsiminen voidaan hypätä yli ja valita loistopisteeksi kuvan ainut valonlähde huomioon ottaen pimennysajat, joiden aikana mitään valoa ei valita loistoksi..

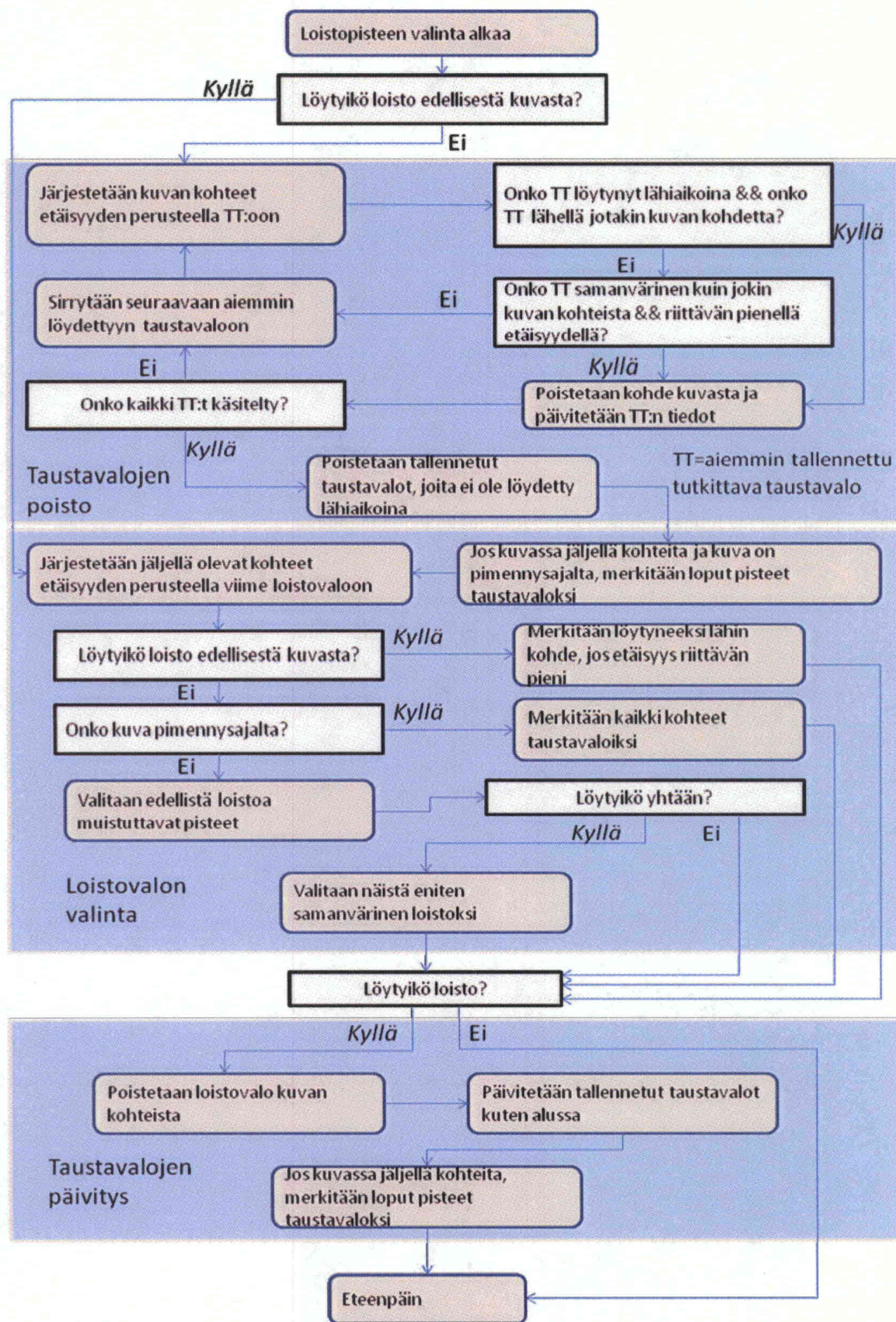
Toisessa tapauksessa kuvassa on ajoittain muita valonlähteitä. Käyttäjä voi tunnistuksen alkaessa halutessaan merkitä valintaruuduilla kuvauksen taustavalo-olosuhteet. Oletuksena on, että kuvassa on taustavaloja. Taustavalokohteiden ominaisuuksia merkitään muistiin ja aina ennen oikean valopisteen etsintää poistetaan kuvasta aiemmin havaitut taustavalokohteet. Taustavalon ominaisuudet, kuten väriarvot, vaihtelevat yleensä vähemmän kuin välähdyksittäin palavan ja väriään vaihtavan sektorivalon. Tämä helpottaa niiden poistamista kuvista. Myös se asia helpottaa niiden tunnistamista, että taustavalot eivät yleensä välähtele vaan palavat kiinteästi, jolloin niitä voidaan etsiä lähes pelkästään perustuen etäisyyteen.

Kun taustavalonlähde löytyy kuvasta, tallennetaan sen ominaisuuksia samoin kuin loiston seuraamisessa tehdään. Valon paikka kuvassa, koko, muoto ja väriarvot tallennetaan. Aiemmin tallennettuja taustavalonlähteitä käytetään loistontunnistusalgoritmissa seuraavalla tavalla: jos loisto on löytynyt edellisestä kuvakehyksestä, taustavaloja ei poisteta ennen loiston hakemista. Tämä sen takia, että loisto löytyy sen palamisaikana helposti peräkkäisistä kehyksistä etäisyyden perusteella. Yleensä loisto valo liikkuu kuvakehysten välillä, eli 1/15 sekunnin aikana alle kymmenen pikselin matkan. Tämän takia ei riskeerata sitä, että loisto poistettaisiin kuvasta ennen hakua, jos sen ominaisuudet olisivat riittävän lähellä jonkin aiemmin tallennetun taustavalopisteen ominaisuuksia. Jos loisto nyt löytyy lähietäisyydeltä, päivitetään aiemmin löydetty taustavalokohteet ja katsotaan onko kuvassa uusia taustavalokohteita. Tämä voidaan tehdä nyt turvallisesti, koska loistokohde tiedetään ja se voidaan jättää välistä tässä taustavalohaussa. Jos loistoa ei löydy, taustavalokohteita ei päivitetä tämän kehyksen kohteista. Tässä halutaan varmistua siitä, että jos loisto olisikin ollut kuvassa ja sitä ei tunnistettu, ei sitä merkitä taustavalokohteeksi.

Jos taas loistoa ei ollut edellisessä kuvakehyksessä, poistetaan ennen löydetty taustavalot etsimällä aiemmin löydettyjen lähiympäristöstä samanvärisiä valoja. Tallennettujen taustavalokohteiden määrä voi kasvaa nopeasti, koska kuvaan tulee uusia taustavaloja kuvakulman vaihtuessa tai jos aiemmin tunnistetut taustavalot hukataan välillä ja tämän jälkeen tallennetaan uudestaan muistiin. Tämän takia taustavalokohteille merkitään aika, jolloin niitä on viimeksi käytetty. Tämä nollataan aina kohteen löytyessä ja muutoin siihen lisätään sitä yksi. Yli kymmenen ”vanhat” taustavalot poistetaan muistista. Valotunnusta voidaan käyttää hyväksi taustavalojen etsinnässä siten, että pimennysaikana kohteita voidaan päivittää tutkimalla lähiympäristöstä ja vertaamalla niiden väriä aiemmin löydettyyn valoon. Palamisaikana tehdään näiden vertailujen lisäksi etäisyyden ja värin vertaaminen edellisessä kehyksessä löydetyn loistovalon ja tutkittavan kohteen välillä. Tällä varmistetaan se, että loistovaloa ei poisteta kuvasta, vaikka se olisi samanvärisen kuin jokin muistissa oleva taustavalonlähde.

Taustavalon löytyessä päivitetään sen tiedot muistiin. Tässä kohtaa on algoritmin heikko kohta: Jos pimennysajan lähestyessä loppuaan kuvaan tulee uusi taustavalonlähde, joka on samankaltainen loiston kanssa, ei sitä voida poistaa kuvasta. Tällöin taustavalojen poistamisen jälkeen kuvassa on useampia loiston näköisiä valoja, joista oikean valitseminen on vaikeaa. Uusia valoja tulee kuvaan useasti, koska veneen liikkuessa sektoriloiston ympärillä kuvattava tausta vaihtuu tasaisesti tai kynnistyksen ollessa lähellä taustavalon keski-intensiteettiä, se kynnystetään pois vain osasta kuvia. Joka tapauksessa kaikille kuvan kohteille tehdään esikarsinta ja loistoksi valitaan jäljelle jääneistä se, jonka RGB-arvot ovat lähinnä viimeisintä löytynyttä loistoa. Tilannetta helpottaa se, että uudet taustavalot ovat yleensä kuvan reunoilla, kun taas loisto pyritään pitämään kuvan keskellä. Tällöin loisto osataan valita verraten etäisyyttä viimeksi löydettyyn loistoon. Tähän ongelmaan voisi auttaa suunniteltu kohdistus- ja vakautusjärjestelmä, joka pitäisi loiston kuvan keskivaiheilla.

Kuvassa 29 on demonstroitu taustavalojen poistamista ennen ja jälkeen loiston kuvasta etsimisen.



Kuva 29: Taustavalojen käsittely algoritmissa

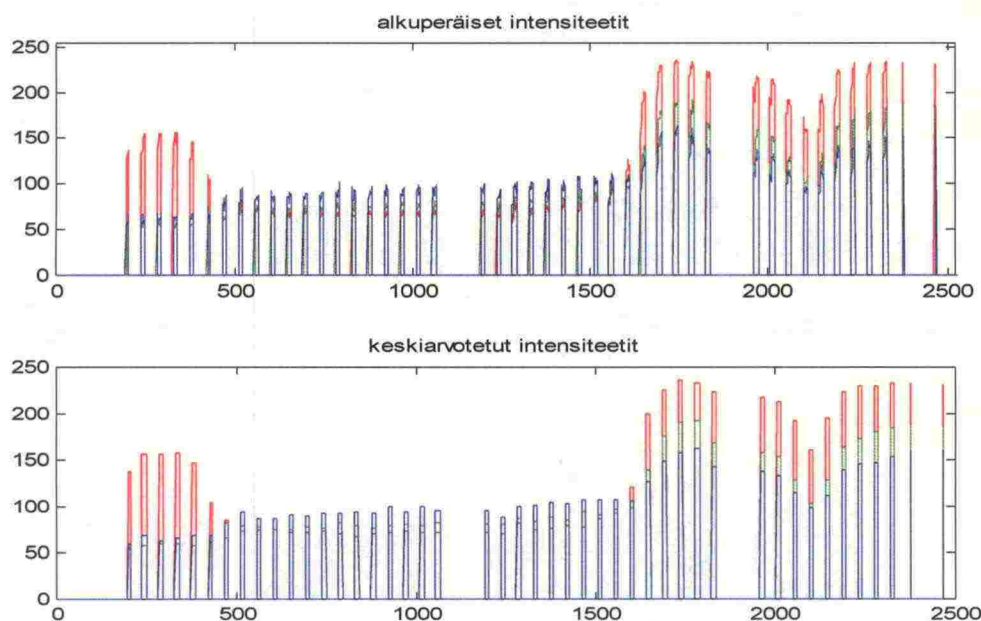
Sektorirajojen löytäminen

Kun kuvattu video on käsitelty kuva kerrallaan ja aina loiston löytyessä kuvasta sen keskimääräiset R- G- ja B-arvot tallennettu omiin vektoreihinsa, on aika käsitellä nämä vektorit ja hakea värirajojen paikat. Värirajoja etsiessä etsitään vektoreista aluksi vakaat alueet, joissa RGB-arvot pysyvät muuttumattomina. Näistä kohdista saadaan puhtaiden sektoreiden RGB-arvot, joiden perusteella näytteet luokitellaan alustavasti vihreiksi, punaisiksi, valkoisiksi tai muutosalueelle. Värin muuttumiskohdat otetaan tarkempaan käsittelyyn. Ensin muunnetaan RGB-arvot CIELAB-arvoiksi muutosalueilla, minkä jälkeen etsitään rajojen paikat vertaamalla muutosalueiden näytteiden eroa muutosalueiden ympärillä oleviin puhtaiden sektorien väreihin.

Värivektorien esikäsittely

Ensimmäiseksi vektoreista etsitään kaikki alle kuuden peräkkäisen näytteen pituiset nollakohdat ja annetaan näille näytteille sama arvo kuin näiden nollakohtien ympärillä olevien kahden näytteen arvon keskiarvo. Kuusi näytettä 15 Hertzin kuvaustaajuudella tarkoittaa korkeintaan 1/3 sekunnin mittaista osaa kuvauksessa, jossa loistoa ei löydy kuvista. Pitempi nollien sarja vektorissa voi tarkoittaa myös aikaa, jolloin loisto on sammuneena ja näitä nollakohtia ei ole tarkoitus tässä vaiheessa poistaa. Aallokossa loisto voidaan kuvauksen aikana kadottaa kuvasta hetkeksi, tämä on mahdollinen syy lyhyiden nollakohtien syntymiseen mittausdataan.

Tämän jälkeen etsitään vektoreista jokainen yksittäinen välähdyks ja merkitään jokaisen yhden välähdyksen näytteille arvoksi keskiarvo välähdyksen intensiteetistä välähdyksen keskikohdasta. Tämä tehdään koska kuten kuvassa 27 näkyy, on loisto syttyessään ja sammuessaan himmeämpi kuin välähdyksen keskikohdalla. Tämän keskiarvotuksen myötä jokaiselle näytteelle yhden välähdyksen aikana annetaan sama väriluokitus, eli tämän algoritmin mukaan sektoriraja ei voi tulla välähdyksen aikana, vaan se tulee välähdyksen välissä. Kiinteästi palavalle loistolle ei näitä operaatioita tehdä. Kuvassa 30 on eräästä kuvauksesta saadut loiston intensiteetit sekä niiden keskiarvotetut arvot.



Kuva 30: Loiston värin keskiarvotus jokaisen välähdyksen ajalta

Väriarvojen haku puhtaille sektoreille

Seuraavaksi etsitään väriarvot puhtaille sektoreille, joita myöhemmin käytetään näytteiden luokittelussa eri väreihin. Puhtailla sektoreilla tarkoitetaan sektorien keskikohtia, valkoisella sektorilla sitä aluetta, jossa sektorivalo näkyy paljaana ilman suodatusta ja värillisillä sektoreilla alueita, joissa valo on kokonaisuudessaan suodattimen takana. Nämä sektorien oletusväriarvot haetaan, koska kun muuttumattomana pysyvät alueet videosta on tunnistettu, löytyvät värien muutosalueet näiden välistä.

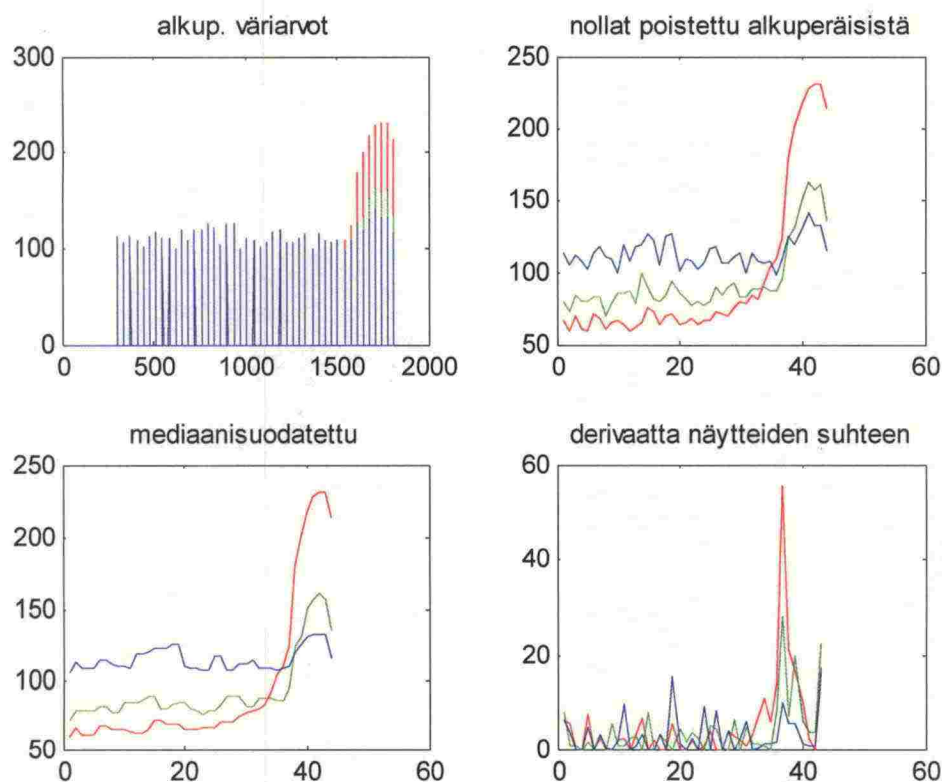
Periaatteena puhtaiden sektorien värien hakemiselle on se, että kuvatessa koko ajan tasaisesti liikkuen kohtisuoraan sektorirajalla tulee mittaustataan sektorien keskiosissa tasaisia kohtia, eli peräkkäisiä näytteitä, joissa värikanavien arvot pysyvät melko tasaisina. Värimuutosalueilla vastaavasti kanavien arvot muuttuvat. Puhtaiksi sektoreiksi tunnistetaan alustavasti kaikki paikat mittaustatassa, joissa kaikkien värikanavien arvot pysyvät yli kolmen loiston välähdyksen ajan riittävän pienellä vaihteluvälillä.

Kiinteinä pysyvien arvojen löytämisen helpottamiseksi jokainen värivektori mediaanisuodatetaan erikseen. Tämä poistaa suurimmat epäsäännöllisyydet peräkkäisten näytteiden välillä. Mediaanisuodattimen pituutena on 3, jos loisto palaa välähdyksittäin ja 15 loiston palaessa kiintovalolla. Ero johtuu siitä, että loiston palaessa välähdyksittäin suodatuksen kohteena ovat värivektorit, joiden yksi alkio vastaa kokonaisen välähdyksen keskiarvotettuja R-, G- ja B-arvoja, mutta loiston palaessa kiinteänä alkuperäisiä värivektoreita ei ole esikäsitelty ja jokainen vektorin luku vastaa yhtä alkuperäistä näytettä.

Väriarvojen muuttumista ajan suhteen tarkastellaan laskemalla derivaatan approksimaatio jokaiselle mediaanisuodatetulle kolmelle värivektorille. Derivaatan approksimaatio saadaan laskemalla kaikille vektorin peräkkäisille näytepareille erotus $\text{näyte}_n - \text{näyte}_{n-1}$. Tämän operaation tuloksena olevassa vektorissa on pieniä arvoja sektoreiden keskialueilla ja korkeita arvoja muutosalueilla. Sitten etsitään kohdat, joissa näiden vektorien arvot ovat pienempiä kuin 10 yli kolmen peräkkäisen välähdyksen ajan sykkivälle loistolle tai pienempiä kuin 5 yli 15 näytteen ajan kiinteästi palavalle loistolle. Tällaisissa kohdissa siis kaikkien kolmen

värikanavan arvot pysyvät riittävän vakioina muutaman välähdyksen ajan, jolloin voidaan päätellä näiden väriarvojen vastaavan joko punaisen, vihreän tai valkoisen sektorin väriarvoja kyseisellä loistolla. Näiden peräkkäisten indeksien kohdilta löytyvät intensiteetit keskiarvotetaan ja merkitään muistiin. Tämän jälkeen nämä löydetty väriarvot on tarkastettava ja tunnistettava joksikin väriksi.

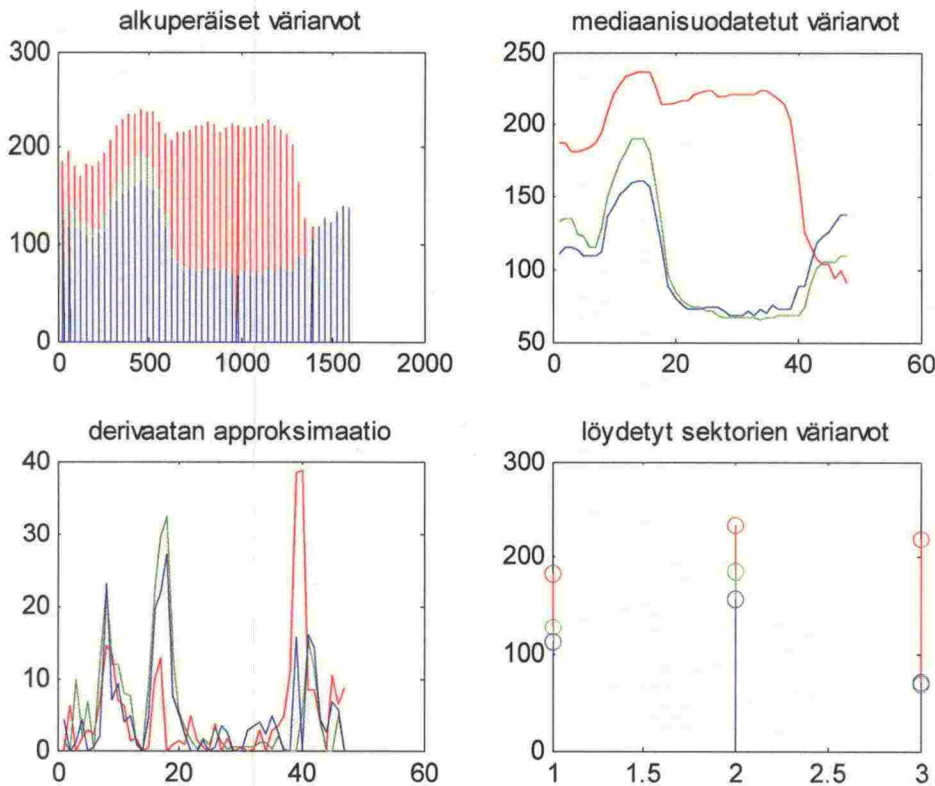
Kuvassa 31 näkyy edellä selitettyjä vektoreita eräälle kuvaukselle. Vasemman yläkulman kuvasta nähdään, että kyseessä on siirtymä vihreältä sektorilta valkoiselle. Valkoista sektoria ei ole kuitenkaan kuvattu riittävän monen välähdyksen ajan, koska kuten oikeasta alakuvasta näkyy, ei derivaatta-vektori saa riittävän monta pientä arvoa sektorirajan jälkeen, jolloin valkoisen sektorin väriarvoa ei saada talteen. Tässä tapauksessa kuvauksen vihreän ja valkoisen raja pitää löytää ilman tietoa valkoisen sektorin oletusväristä.



Kuva 31: Puhtaiden sektorien väriarvojen etsiminen värivektorien vakaiden alueiden perusteella

Neljän välähdyksen aika on melko lyhyt kiinteiden sektoriväriarvojen hakemiseen, joten alueet, joissa sektorin väri vaihtuu toiseksi epätavallisen hitaasti, saatetaan myös laskea puhtaaksi värialueeksi. Tämän takia löydetty värit tarkistetaan ja ylimääräiset värit poistetaan. Esimerkkinä kuvassa 32 on väriarvojen mediaanisuodattamisen ja derivaatan arvioimisen jälkeen löydetty kolme sektoriväriä, vaikka kuvauksessa on käyty vain kahden puhtaan värialueella. Kuvaus on alkanut alueelta, jossa ei olla puhtaasti valkoisella sektorilla, sitten on siirrytty kapean valkoisen sektorin kautta punaiselle ja lopulta vihreän sektorin alkuun. Koska alussa väriarvot pysyvät melko samankaltaisina muutaman välähdyksen ajan, on tämä väri oletettu puhtaaksi väriksi ja sen väriarvot merkitty muistiin. Tämä väri on oikean alakuvan vasemmanpuoleinen värikolmikko. Tämän jälkeen lyhyen valkoisen sektorin väri on merkitty muistiin (keskimäinen värikolmikko) ja lopulta punaisen sektorin väri. Nyt muistissa olevista väreistä kaksi näyttää valkoiselta, koska punaisen, vihreän ja sinisen kanavan arvot ovat riittävän lähellä toisiaan. Lisäksi on löydetty selkeästi punainen väri. Kahdesta

valkoisesta toinen on poistettava, koska vain toinen niistä vastaa aitoa valkoisen sektorin väriä. Tässä tapauksessa poistetaan himmeämpi kahdesta valkoisesta, koska puhtaasti valkoisella sektorilla valon edessä ei ole värisuodatinta himmentämässä sitä.



Kuva 32: Puhtaiden sektorien referenssivärit etsitty värivektorin tasaisten alueiden perusteella. Ensimmäinen referenssiväreistä on ylimääräinen ja se on poistettava ennen sektorirajojen etsintää.

Samalta sektorilta saatetaan myös löytää enemmän kuin yksi hieman toisistaan poikkeavaa väriä, jotka poistetaan niin, että muistiin laitetaan vain yksi arvo kuvaamaan tiettyä väriä. Jos kaksi samankaltaista väriä on vierekkäin, eli niiden välissä ei ole toisenlaista väriä, ne ovat todennäköisesti samalta sektorilta. Tällöin nämä värit yhdistetään. Yhdistetylle värille annetaan RGB-arvoiksi kahden alkuperäisen värin painotettu keskiarvo. Painona on peräkkäisten näytteiden lukumäärä, joka väriä on löytynyt. Yhdistetyn värin R-värikanavan arvon laskutapa esitetty kaavassa 9. G- ja B-värikanavat lasketaan samalla tavalla. Jos värit eivät ole vierekkäin, valitaan se, jota on löytynyt suurempi määrä peräkkäisiä näytteitä ja toinen poistetaan. Kaikki alun perin löydetty värit käydään läpi pareittain.

$$R_{uusi} = \frac{(R_1 \cdot pituus_1 + R_2 \cdot pituus_2)}{pituus_1 + pituus_2}, \quad (9)$$

missä R_{uusi} on yhdistetyn värin R-värikanavan arvo, R_1 ja R_2 ovat kahden vierekkäisen samankaltaisen värin R-komponentit ja $pituus_1$ ja $pituus_2$ näiden värien pituudet.

Tämän jälkeen löydetty väriarvot on merkittävä tarkoittamaan joko punaisen, valkoisen tai vihreän sektorin väriä. Tunnistusta vaikeuttaa se, että vihreän sektorin värisuhteet R/G sekä R/B saattavat olla lähellä yhtä, jonka kaltainen väri on helposti tulkittavissa valkoiseksi.

Toisena esimerkkinä valkoisen sektorin valo voi olla punertava, ja sen punaisen kanavan arvo suurempi kuin punaisella sektorilla. Toisaalta fokuksessa kuvatun valkoisen sektorin vihreä kanava saattaa olla voimakkain ja yleensä se on voimakkaampi kuin vihreän sektorin vihreä kanava.

Värien merkitsemiseen voidaan kuitenkin käyttää joitakin sääntöjä, joiden pitäisi toimia kaikilla värisuodattimin toteutetuilla loistoilla. Valkoisen sektorin värikanavien summa on oltava korkeampi kuin vihreän tai punaisen johtuen värien suodattamisesta valkoisesta väristä punaisella ja vihreällä sektorilla, punaisen sektorin suhde R/G on oltava suurempi kuin muilla sektoreilla. Vihreällä kanavalla G/B-suhde saattaa olla alle 1, eli vihreä väri ei olekaan voimakkain. Tämän takia vihreä väri haetaan vasta viimeisenä kun punainen ja/tai valkoinen väri on löydetty. Valkoisesta väristä vihreä erottuu himmeydellään ja punaisesta suhteella R/G.

Kuvatessa on tarkoitus ajaa 1-2 sektorirajan yli, koska algoritmi tallentaa jokaiselle värille vain yhdet referenssiarvot. Jos kuvattaisiin kaksi punaista sektoria, joista toinen on hieman erivärinen kuin se, jonka väri merkitään referenssipunaiseksi, näiden molempien rajojen paikkoja etsittäisiin käyttämällä tallennettua referenssipunaista. Loistoja, joiden värisuodattimet ovat hyvälaatuiset, voidaan kuvata useammankin sektorin matkalta. Suodattimien ollessa ehjät, puhtaat ja samasta materiaalista valmistetut samanvärisillä sektoreilla, ovat sektorien suodatetut värit riittävän samankaltaisia samanvärisillä sektoreilla. Tällöin yksi referenssiarvo riittää kuvaamaan kaikkien loiston samanväristen sektorien väriä.

Näytteiden luokittelu väreihin

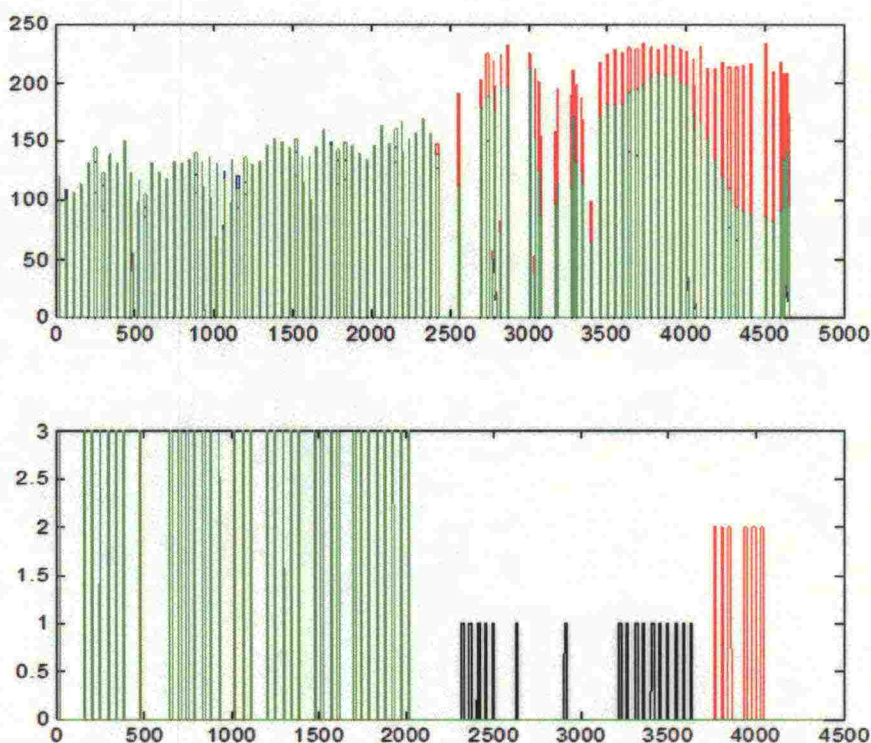
Kun mittausdatasta on löydetty oletusväriarvot puhtaille sektoreille, luokitellaan näytteet jonkin sektorin väriseksi tai muutosalueelle. Sektorien vaihtumiskohdat etsitään tämän jälkeen tarkemmin näiltä muutosalueilta.

Aluksi näytteistä tarkistetaan, että kuuluvatko ne johonkin niistä väreistä, joista on tallessa keskisektorin oletusväri. Näytteet luokitellaan siten, että niiden R- G- ja B-kanavien arvoja ja näytteiden värikanavien suhteita R/B sekä G/B verrataan löydettyjen puhtaiden sektorien vastaaviin, ja jos ne ovat kaikki riittävän samankaltaisia, luokitellaan näyte täksi väriksi. Sopivaksi toleranssiksi näytteiden luokittelussa tiettyyn väriin havaittiin testaamalla $\pm 20\%$ keskisektorin referenssiarvoista. Tällaista vaihteluväliä käyttämällä suurin osa RGB-arvojen vaihtelusta puhtaan värin alueella hyväksyttiin, mutta punainen, vihreä ja valkoinen sektori olivat selkeästi toisistaan erillään ja niiden välille tuli muutosalue, jossa näytteitä ei luokiteltu mihinkään väriin.

On mahdollista, että kuvattu puhdas väri jää tunnistamatta aiemmassa vaiheessa esimerkiksi, jos sitä on kuvattu liian lyhyt aika tai kameran voimakas heiluminen on aiheuttanut vaihtelua kameran havaitsemana loiston kirkkautena. Tällaisessa tapauksessa puhtaan värin alueet yritetään tunnistaa ilman referenssiarvoja. Esimerkiksi, jos kuvauksessa on käyty kaikilla kolmella sektorilla, mutta algoritmi on löytänyt referenssiarvot vain punaiselle ja valkoiselle, on käytettävä lähes kiinteitä sääntöjä vihreän referenssivärin etsimiseen. Näyte yritetään aina ensin luokitella käyttäen löydettyjä referenssiärejä puhtaille sektoreille. Näyte yritetään luokitella punaiseksi käyttäen lähes kiinteitä sääntöjä vain silloin kun punaista referenssiä ei ole löytynyt ja samoin muille väreille. Nämä lähes kiinteät säännöt luokittelevat näytteen värikanavien suhteiden perusteella, mutta tarkastavat, että näytteen väri on riittävän erilainen verrattuna löydettyihin referenssiäreihin, jotta kyseessä voisi olla selkeästi toinen väri.

Kun näytteet on luokiteltu puhtaisiin väreihin, poistetaan äkilliset poikkeamat luokittelun tuloksena saadusta vektorista. Tämän seurauksena luokitetusta vektorista poistuvat kohdat, joissa loiston väri on ollut lähellä kahta väriä ja sitä on luokiteltu vuoroin molempiin väreihin. Lopuksi, jos jollekin värille ei ole aiemmin löytynyt referenssiarvoa ja tämän luokittelun jälkeen tätä väriä on kuitenkin löydetty käyttäen kiinteitä luokittelusääntöjä, merkitään tälle värille referenssiarvot löydettyjen näytteiden väriarvojen keskiarvona.

Kuvassa 33 on ylempänä loiston RGB-arvot ja alempana löydetyt puhtaan värin alueet. Tämä kuvaus tai loistopisteen etsintä ei ole täysin onnistunut, kuten kuvan keskivaiheilta näkyy. Loistopiste on todennäköisesti hetkellisesti hukattu kuvauksen aikana tai kuvauksen keskivaiheilla on kuvaan tullut mukaan loistoa muistuttava taustavalo, joka on sekoittanut loistopisteen etsimisalgoritmin. Myöhemmin valkoisen sektorin loppu ja punaisen sektorin alku on löydetty kuvista. Alakuvassa on luokitteluvektori, jossa valkoinen sektori on merkitty mustalla värillä. Etenkin valkoisen sektorin kohdalla vektori on hyvin hajanainen, mutta tämä ei vaikuta rajojen löytymiseen.



Kuva 33: Kuvauksen RGB-arvot ja tunnistetut puhtaiden värien alueet.

Rajan määrittämisen muuttuminen työn edetessä

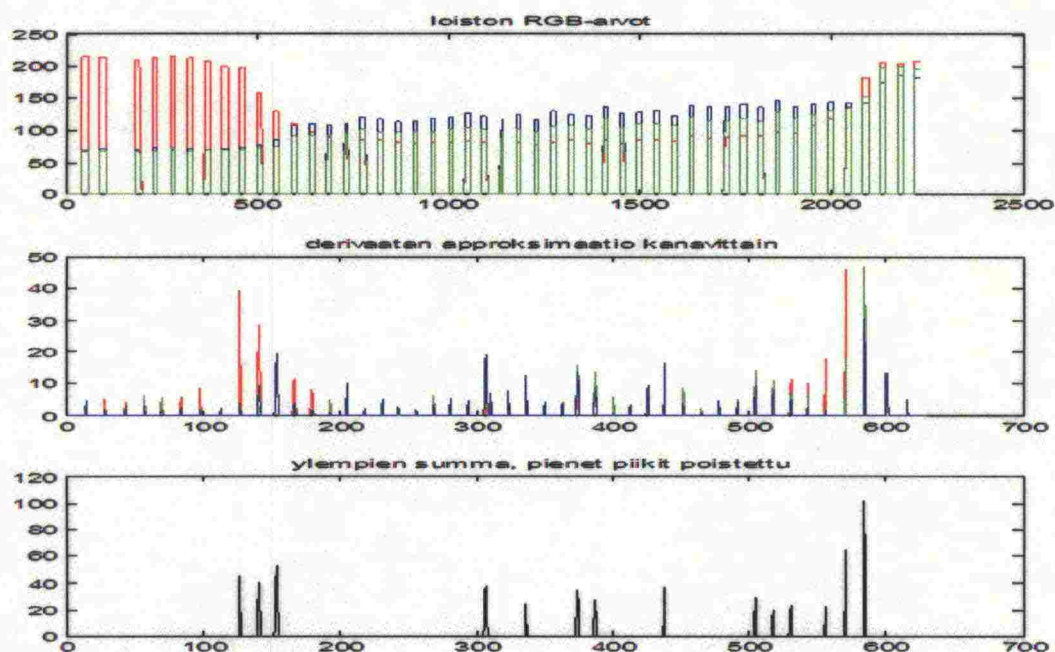
Periaate, jolla värirajan paikat haettiin, muuttuivat työn edetessä. Aluksi rajojen paikat oli tarkoitus määrittää samankaltaisella tarkastelulla kuin puhtaiden sektorien paikat haetaan, eli tutkimalla näytteiden värikanavien suhteita ja vertaamalla niitä puhtaiden sektorien referenssiarvoihin. Rajojen haku jaoteltiin kolmeen tapaukseen, rajaan punaisen ja valkoisen sektorin välillä, rajaan punaisen ja vihreän sektorin välillä sekä rajaan valkoisen ja vihreän sektorin välillä. Sitten muutosaluetta käytiin läpi näyte kerrallaan ja merkittiin raja siihen paikkaan, missä tietyt ehdot täyttyivät. Tällainen tarkastelu oli kuitenkin liian erikoistunut tietynlaiseen dataan, jossa punaisen, vihreän ja valkoisen sektorin RGB-arvot pysyivät tietyllä melko pienellä vaihteluvälillä. Kuitenkin, kuten mainittua, eri loistojen sektorien väreistä ei ole takuuta, ja käyttämällä erilaisia kameran asetuksia samalla loistolla, saadaan loiston valon

RGB-arvot ja niiden suhteet hyvinkin erilaisiksi. Merkittävimmät kuvatun loiston ominaisuuksiin vaikuttavat kameran asetukset ovat kamerasta manuaalisesti säädettävä tarkennus sekä ohjelmallisesti säädettävä valotusaika.

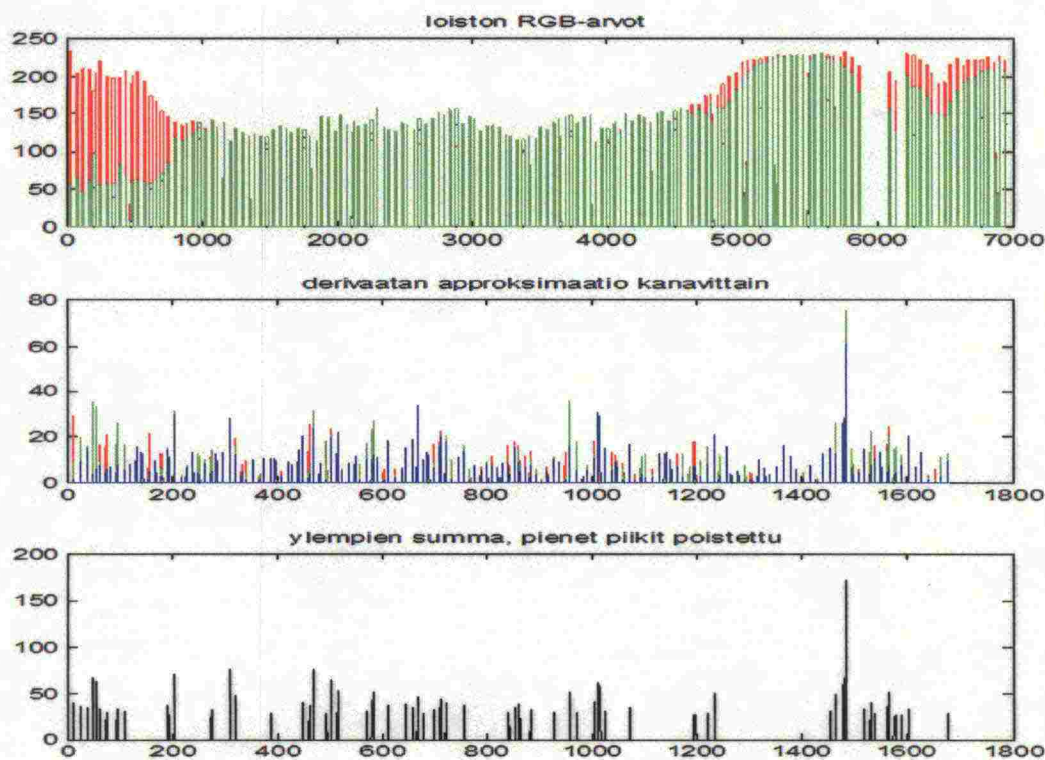
Toisena kokeiltuna periaatteena rajojen etsinnässä oli käyttää apuna RGB-vektorien muuttumista ajan suhteen. Jokaiselle vektorille R, G ja B tehtiin erikseen derivaatan approksimaatio muutosalueen näytteille. Tämä saatiin vähentämällä alkuperäisestä vektorista yhdellä viivästetty vektori. Tämän jälkeen nämä kolme vektoria summattaisiin ja summatun vektorin maksimikohdat vastaisivat paikkaa muutosalueella, missä väri vaihtuisi nopeimmin. Ajatuksena oli se, että todennäköisesti rajan vaihtuminen havaitaan ihmissilmälläkin siinä kohdassa, missä värin ominaisuudet vaihtuvat nopeimmin. Tämä toteutustapa toimikin sellaisella datalla, jolla muutosalueet ovat riittävän lyhyet, eli rajan yli on ajettu melko nopeasti tai kuvaus on tehty läheltä loistoa. Jos rajan yli on ajettu hitaasti, vaihtuu loiston väri liian verkkaisesti, jotta RGB-vektorien derivaattaan tulisi selkeitä piikkejä. Piikit ovat amplitudiltaan pienempiä ja jakautuvat tasaisesti koko värinmuutosalueelle.

Toinen epävarmuutta tuova tekijä tämän rajanhakuperiaatteen toimivuuteen oli se, että epäsäännöllisyydet datassa (datalla tarkoitetaan tässä RGB-vektoreita, eli kuvatusta videosta etsityn loistopisteen RGB-arvoja) värinmuutosalueella tekevät derivaattaan piikin, joka merkitään värirajan paikaksi. Epäsäännöllisyydet datassa aiheutuvat yleensä jostakin taustavalopisteestä, jonka ominaisuudet ovat sen verran kaukana muistiin merkittyjen taustavalopisteiden ominaisuuksista, että sitä ei poisteta hausta ja sen verran lähellä viime kerralla löydetyn loistopisteen ominaisuuksia, että se virheellisesti valitaan loistoksi. Pelkkiä derivaatan approksimaation huippuja tarkastelemalla ei voida tietää mistä mikin huippu on aiheutunut. Seuraavat kuvat kuvaavat edellä kuvattuja ongelmia.

Kuvassa 34 on tapaus, jossa rajan yli on ajettu melko nopeasti, jolloin derivaatan piikitkin näkyvät selkeästi. Tämän kuvauksen rajat olisi voitu tunnistaa derivaatasta ja laittaa se muutosalueelle kohtaan, jossa piikit ovat voimakkaimmat. Kuvassa 35 näkyy toinen tapaus, jossa derivaattavektoreista ei voi tunnistaa, missä kohtaa väri vaihtuu eivätkä värinmuutosalueet erotu mitenkään puhtaan värin alueista. Puhtaan värin alueet ovat tässä kuvauksessa sen verran epävakaita, että derivaattavektoreissa näkyy nollasta poikkeavia arvoja joka puolella. Ainoa selkeästi taustasta erottuva piikki derivaattakuvissa aiheutuu epäsäännöllisen suuresta muutoksesta loiston värissä sen jälkeen kun loisto on hetkeksi hävinnyt kuvassa, kuten kuvan 35 kuvakolmikon ylimmän kuvan näytteen 6000 ympäristössä näkyy. Tämä värinmuutos ei kuitenkaan johdu sektorin vaihtumisesta, sillä kyseisessä paikassa ollaan valkoisella sektorilla, jonka väri hieman vaihtelee tai kameran heilunta on aiheuttanut havaittuun valon intensiteettiin vaihtelua.



Kuva 34: Sektorirajan etsintä perustuen värikanavien intensiteetin muutoksen maksimikohtiin.

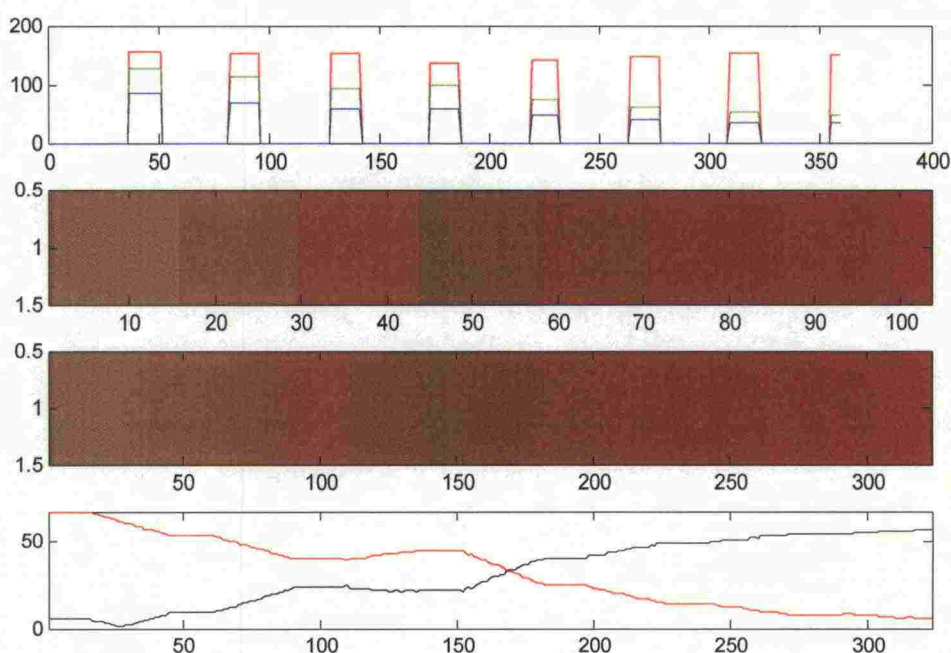


Kuva 35: Sektorirajan etsintä perustuen värikanavien intensiteetin muutoksen maksimikohtiin. Selkeitä huippukohtia ei löydy, jolloin rajoja ei löydy tällä periaatteella.

Värirajan määrittäminen

Lopulta varsinainen värirajojen paikkojen määrittäminen voidaan tehdä, kun puhtaat alueet ja niiden referenssiväriarvot sekä niiden välissä olevat muutosalueet on löydetty. Ennen rajojen hakua tarkistetaan, onko muutosalueilla riittävästi nollasta poikkeavia näytteitä. Jos

muutosalue on hyvin lyhyt, laajennetaan sitä alusta ja lopusta niin, että se koostuu vähintään viidestä loiston välähdyksestä. Nyt värinmuutos on varmemmin tällä tarkasteltavalla alueella. Toimivimpana testatuista menetelmistä rajojen hakemiselle on muuntaa väriarvot RGB-avaruudesta CIELAB-avaruuteen ja tarkastella värinmuutosta tässä avaruudessa. Perusteluna tälle vaihtoehdolle on se, että raja tulee löytää siltä kohdalta, jossa ihmissilmä sen havaitsee olevan ja CIELAB-avaruus soveltuu tähän paremmin kuin RGB-avaruus. Toisena perusteena väriavaruuden valinnalle on se, että poistumalla kiinteiden rajasääntöjen käytöstä ja siirtymällä mittausdatasta riippuvaan rajanpaikannukseen, on järjestelmä robustimpi toimimaan erikaltaisilla loistoilla ja mittausolosuhteilla. Työssä käytetyistä väriavaruuksista kerrotaan enemmän luvussa 2.2.1.



Kuva 36: Sektorirajan paikan määrittäminen perustuen etäisyyteen puhtaiden sektorien referenssivärien ja muutosalueen näytteiden välillä.

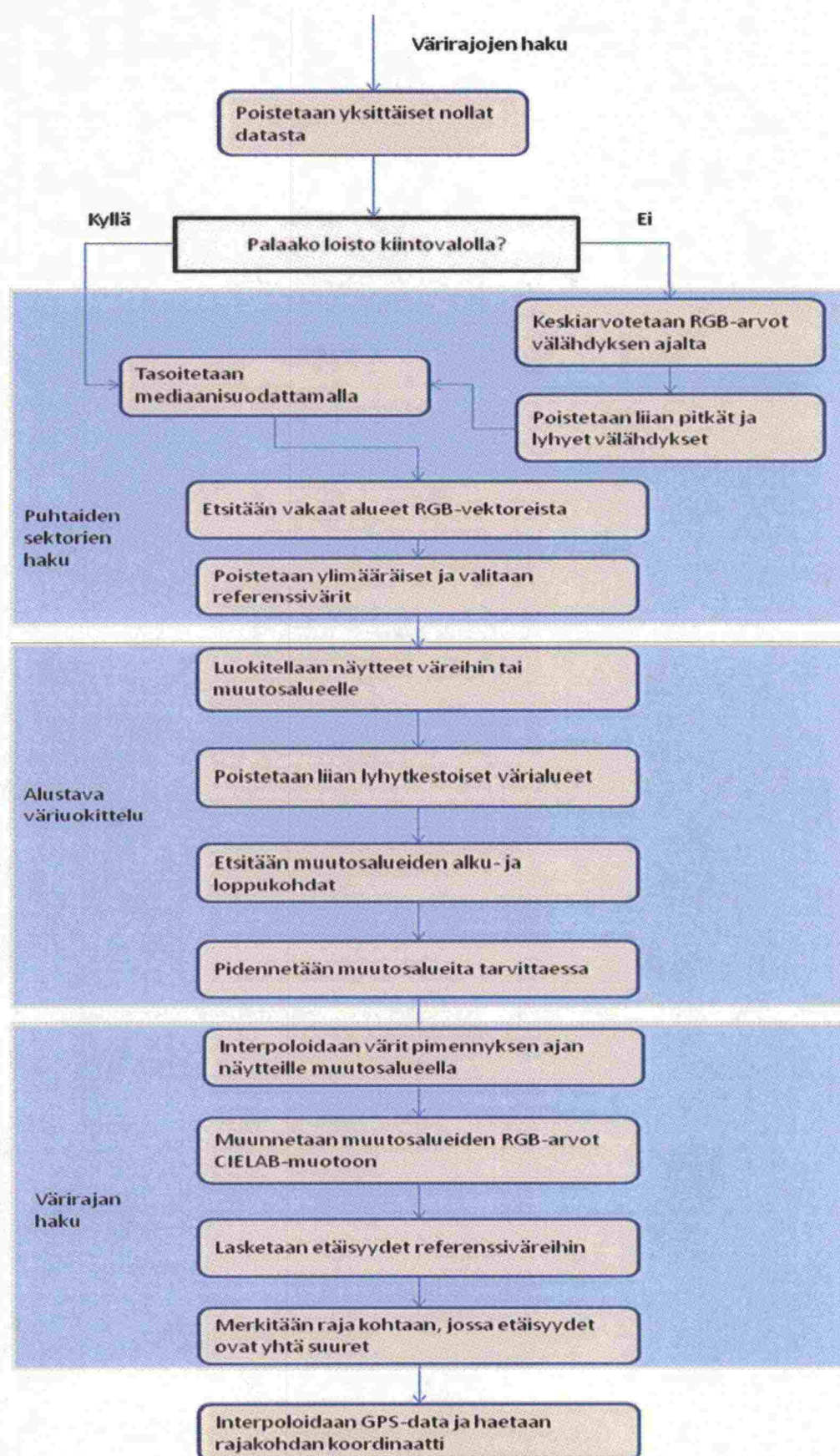
Aiemmin löydettyjen muutosalueiden näytteet sekä puhtaiden sektorien referenssiväriarvot muunnetaan CIELAB-muotoon, jonka jälkeen näytteiden euklidiset etäisyydet näihin puhtaisiin väreihin lasketaan. Ennen etäisyyksien laskemista loiston välähdyksen keskiarvotettut väriarvot interpoloidaan, jotta värinmuutos olisi pehmeämpi. Interpolointi tehdään jokaisen kahden peräkkäisen välähdyksen välille oleville näytteille, eli pimennysajan näytteille. Interpolointi tehdään lineaarisesti jokaiselle värikanavalle erikseen peräkkäisten välähdysten keskiarvotettujen RGB-arvojen välillä. Etäisyyden laskemisen tuloksena saadaan kaksi vektoria, jotka kuvaavat etäisyyttä tai virhettä kyseisen rajan ympärillä olevien sektorien väreihin. Sektorin raja merkitään indeksille, jolla nämä kaksi vektoria leikkaavat. Toinen vektoreista on aina alussa arvoltaan pieni ja sen derivaatta on positiivinen ja toinen vektori on derivaataltaan negatiivinen sekä sen arvo on alussa suuri. Vektorit leikkaavat muutosalueella aina, jos kuvaus ja loistopisteen tunnistus on onnistunut.

Kuvassa 36 on yläkuvassa loiston RGB-arvot muutosalueella värin vaihtuessa valkoisesta punaiseksi. Tämän alapuolella on keskiarvotettu loiston väri tällä alueella. Kuvassa on värit ainoastaan niiltä näytteiltä, joilta loisto on löytynyt, tämän takia kuvassa on näytteitä vähemmän kuin yläkuvassa. Kolmannessa kuvassa ylhäältä näkyy loiston väri interpoloinnin

jälkeen. Interpolointi tehdään loiston pimennysajan näytteille, jolloin tämä interpoloitu vektori on yhtä pitkä kuin alkuperäinen muutosalue. Alakuvassa ovat vektorit, joista punainen kuvaa muutosalueen CIELAB-muotoon muunnettujen näytteiden etäisyyttä punaisen sektorin väriin ja musta kuvaa samojen näytteiden etäisyyttä puhtaaseen valkoiseen väriin. Raja merkitään värinmuutosalueen indeksille, jolla koordinaatiston mukainen havainnollinen etäisyys on yhtä suuri molempiin puhtaisiin väreihin. Keskusteluissa väyläntarkastajien kanssa Hangon kuvausmatkalla selvisi, että he merkitsevät valkoisen rajan mieluummin lähemmäs puhdasta valkoista kuin suurimman värinmuutoksen kohdalle, koska tällöin merkityn valkoisen sektorin sisään jäävä sektori on varmemmin turvallinen. Tässä mielessä käytetty menetelmä on erilainen.

Ennen rajan hakua on varmistuttu siitä, että muutosalueella on riittävän monen välähdyksen ajalta näytteitä, jolloin väriraja osuu varmemmin tarkasteltavalle alueelle.

Värirajojen hakemisen päävaiheet on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37: Väri rajojen hakeminen

Mittausdatan hankinta ja järjestelmän testaus

Mittausdatan kerääminen tarkoittaa tämän järjestelmän tapauksessa samaa kuin sen toisen osan testaus, koska kuvaaminen oikeissa olosuhteissa toi AVI-videoiden lisäksi myös paljon tietoa kuvaamisen haasteista.

Alustava testaus Siilinkarin loistolla

Ensimmäinen järjestelmän testaus oikeissa olosuhteissa pidettiin 2.8.2007. Kuvasimme Siilinkarin loistoa pienveneeltä hämärtyvässä illassa, jolloin aluksi oli hieman taustavaloa ja lopuksi näkyi vain loisto. Tarkoituksena oli testata kameran asetusten toimivuutta oikeissa olosuhteissa sekä kerätä testidataa värintunnistamisalgoritmia varten.

Tässä testissä paljastui monta senhetkisen järjestelmän ongelmakohtaa. Yhdeksi ongelmakohdaksi havaittiin kameran pitäminen koko kuvauksen ajan kohdistettuna kohti loistoa. Tämä johtui siitä, että valittu resoluutio oli melko pieni, 640x480 pikseliä, ja valotusaika pidettiin mahdollisimman pienenä loistopisteen pitämiseksi pistemäisenä. Kameraa pidettiin kädessä kuvatessa, ja pienellä resoluutiolla pienikin heilautus aiheutti loistopisteen siirtymisen kuvan ulkopuolelle. Tähän vaikutti myös se, että ensimmäiset kuvaukset tehtiin lähempänä loistoa kuin oikea sektorirajojen tarkastus tehdään. Liian pienellä valotusajalla kuvaaminen sai aikaan sen, että valoisuutta jouduttiin nostamaan, jolloin kuvassa näkyi paljon yhtenäistä kohinaa ja sektoriloisto näkyi heikosti esikatselukuvassa. Tämä vaikeutti entisestään kameran kohdistamista.

Toinen ongelmakohta liittyi kuvien tallentamiseen. Kun MATLAB:lla tehty AVI-tiedosto ylittää 2 Gigatavua, tiedosto korruptoituu. Korruptoitunutta tiedostoa ei enää saa MATLAB:in aviread-funktiolla auki. Pakkaamattomana 640x480x3 resoluutiolla 8-bittisinä 15 Hertzin kuvaustaajuudella 2 Gigatavun raja tulee vastaan, kun on kuvattu

$$\frac{2 \cdot 1024^3 \cdot 8}{640 \cdot 480 \cdot 3 \cdot 8 \cdot 15} \cong 155.3 \text{ sekuntia.} \quad (10)$$

Tämä aika saattaa olla riittävä, kun kuvaus aloitetaan sektorin vaihtumiskohdassa, mutta jos halutaan kuvata samalla monta sektorirajaa, on se liian pieni.

Toinen testauskerta Siilinkarilla

Toinen testi järjestettiin 15.8. Siilinkarin loistolla. Tavoitteena oli kerätä mittausdataa Indeo3-kompressiolla pakattuna AVI-tiedostona sekä testata kameran asetuksia, joita oli muutettu viime testien jälkeen. Indeo3-pakkaus on yksinkertaisempi kompressoititapa kuin MATLAB:in muut käytössä olevat värikuviin tarkoitetut videokoodit. Muut koodit, kuten Cinepak ja Indeo5 ovat hienostuneempia koodikkeja, ja siten myös aikaa vievempiä suorittaa. Tämän takia niiden käyttäminen reaaliaikaiseen kuvien tallentamiseen oli ongelmallista, koska kuvien tallennus olisi huomattavasti hitaampaa kuin niiden kaappaus. Tämä nostaisi MATLAB:in muistinkulutuksen nopeasti liian korkeaksi. Kaikkia MATLAB:in

tukemia videokoodekkeja testattiin erivärisillä LED-valoilla sekä taskulampun valolla ja havaittiin, että dekoodatun videon värikanavien arvot olivat kaikille koodkeille sekä pakkaamattomalle videolle niin samankaltaisia, että Indeo3-koodekin käyttö onnistuisi myös oikean loistovalon kuvaamiseen.

Edellisellä testauskerralla kuvaaminen oli hankalaa, koska heikon valaistuksen takia kameran vahvistuksen sekä valoisuuden arvot oli nostettu erittäin korkeiksi. Tällöin kuitenkin havaittiin, että yli 30 ms valotusajallakin saadaan kuvattua niin, että loisto pysyy kuviissa vielä pistemäisenä. Tämän takia valotusaikaa päätettiin nostaa 30-50 ms tasolle, jolloin muita asetuksia, kuten kuvan terävyyttä ja valoisuutta säätämällä saataisiin kuvaan vähemmän kohinaa. Lisäksi mukaan otettiin jalusta kameralle helpottamaan kuvaajan työtä.

Kuvaaminen olikin tällä kertaa huomattavasti helpompaa kuin ensimmäisen testin asetuksilla. Kuvan kohdistaminen loistopisteen kohdalle kävi helpommin jalusta avulla ja myös sen takia, että kuvausetaisyys oli tällä kertaa suurempi kuin ensimmäisissä testeissä. Pieni kohinataso helpotti myös kuvausta, nyt kuvassa näkyi vain loistopiste ja muut taustaa kirkkaammat valonlähteet.

Ongelmakohdaksi havaittiin tällä kertaa se, että pienellä vahvistuksella saatiin kuva kohinattomaksi, mutta myös loistopiste näkyi heikosti kuvassa. Tämä ei ollut ongelma vielä valkoisen ja punaisen sektorin kohdalla, mutta Siilinkarin loiston vihreä sektori on intensiteetiltään niin pieni, että se saatiin juuri ja juuri erottumaan taustavalosta. Kuvaa ei voinut näillä asetuksilla myöskään säätää pois fokuksesta, jolloin loisto olisi levinnyt kuvaan useampien pikselien alueelle, koska se olisi entisestään pienentänyt loiston kirkkautta kuvassa. Loisto jäi hyvin pieneksi, alle 40 pikselin kokoiseksi käytettäessä 640x480-resoluutiota. Tällainen pienen kokoinen ja intensiteetiltään pieni kohde on tunnistusalgoritmilta vaikeampi kohde etsiä kuvasta.

Toinen ongelmakohta liittyi muistinkulutukseen kuvauksen yhteydessä. Kuvausta testatessa työpaikalla pysyi muistinkulutus kohtuullisena, mutta veneessä se nousi huomattavasti nopeammin kuvauksen edetessä. Tähän oli syynä liian suuri kuvan valoisuus. sekä osittain myös se, että veneessä tietokonetta ei kytketty virtalähteeseen, jolloin tietokone automaattisesti pienensi prosessorin kellotaajuutta resursseja säästääkseen ja akun kestoa pidentääkseen. Tämä sai aikaan sen, että kuvien tallennus kestii pidempään kuin normaaliolosuhteissa ja tulevat kuvat puskuroitiin muistiin odottamaan tallennusta. Mahdollinen syy lisääntyneelle muistinkulutukselle oli myös tietokoneen tärinä veneessä.

Muut testauskerrat Siilinkarilla ja Raumalla

Järjestelmää testattiin seuraavaksi toisten objektiivien kanssa ensin Mittaus- ja Informaatiotekniikan laitoksen kaiuttomassa tilassa ja sen jälkeen Siilinkarilla. Kaiuttoman tilan testaus tehtiin sen takia, että kyseisessä tilassa ei ole ikkunaa ja se saadaan mahdollisimman pimeäksi. Tarkoituksena oli testata eri objektiivien valoherkkyyttä. Laitoksen käytössä olleista objektiiveista löytyikin paremmin yökuvaukseen soveltuva objektiivinen kuin aikaisemmin käytössä ollut.

Edellisestä testikerrasta jäi kuvauksen aikainen muistinkulutus ongelmakohdaksi. Seuraavalla testikerralla oli mukana veneen akkuun invertterin kautta kytkettävä tietokoneen virtalähde, joka osaltaan vaikutti tietokoneen toimintaan. Kuitenkin suurempi säästö muistinkulutuksessa saatiin sillä, että kuva säädettiin mahdollisimman mustaksi niin, että vain kirkkaat valonlähteet näkyivät ruudulla. Tämä nopeutti kuvien tallentamista huomattavasti ja esti muistin kuormittumisen. Kuva säädettiin pääasiassa valoisuutta säätämällä. Terävyyden

säätäminen suuremmaksi, eli kuvan ylipäästösuodattaminen toi visuaalisesti saman tuloksen kuvaan kuin valoisuuden pienentäminen, mutta tämän syvällisempää vertailua ei näiden asetusten vaikutuksista tehty.

Kuvauksia tehtiin myös kerran Rauman saaristossa Nurmeksen loistolla. Kyseinen loisto on Raumalta saaristomerelle vievän väylän suulla ja ulkomereltä tulevat aallot tulevat suoraan sitä kohti. Aallokon takia loiston pitäminen kuvassa oli vaikeaa. Nurmeksen loiston valotunnus on sellainen, että se palaa 0,6 sekuntia ja on pimentyneenä 5,4 sekuntia.[3] Koska loiston pimennysaika on erikoisen suuri, olisi värinvaihtumiskohdilla pitänyt ajaa todella hiljaa, jotta värinmuutos olisi saatu tallennettua videolle. Se oli kuitenkin pienveneellä aallokossa mahdotonta, koska veneen keulasuunta alkoi kääntyä vauhtia hiljennettäessä. Tämän lisäksi kameran heiluessa ei jokaista harvoin tullutta välähdystä saatu tallennettua, jolloin videolle tallentui liian vähän dataa värinrajojen luotettavaa tunnistusta varten.

Sellainen havainto kuitenkin Rauman matkasta voitiin tehdä, että loiston valo näytti sekä visuaalisesti että RGB-arvoiltaan samanlaiselta kuin Siilikarin loiston valo. Vihreä sektori oli visuaalisesti tarkasteltuna ennemminkin sinivihreä, punainen sektori puhtaasti punainen ja valkoinen selkeästi kirkkain.

Viimeisessä Siilikarin testissä oli tarkoitus testata järjestelmän toistettavuutta ajamalla saman rajan yli useasti ja laskemalla rajanvaihtumiskoordinaatit, jonka jälkeen niitä vertailtiin toisiinsa. Tästä on kerrottu enemmän luvussa 8: Tulokset. Ajoimme myös veneellä lähelle loistoa ja havaitsimme, että kauempaa sinivihreältä vaikuttava väri on lähempää selvästi puhtaamman vihreä.

Hangon testi

Viimeiset testit tehtiin Hangossa 20.11.2007. Tarkoituksena oli testata järjestelmää erilaisilla loistoilla sekä demonstroida sen käyttöä Merenkulkuhallituksen väyläntarkastajille. Testeissä tutustuttiin myös Suomen ensimmäiseen käytössä olevaan LED-sektoriloistoon.

Eri loistojen erot valojen intensiteeteissä kävi selvästi ilmi ensimmäisen kuvauksen aikana, kun kuvatus loiston vihreä sektori oli liian himmeä noin kilometrin etäisyydeltä kuvattaessa. Loisto ei erottunut taustasta kuvassa valotusajan ollessa noin 65 millisekuntia, eli suurin jota 15 Hertzin kuvaustaajuudella voidaan käyttää. Tällaista loistoa kuvattaessa pitää kuvausetäisyyden olla pienempi. Tämän loiston värisuodattimet olivat kuluneet ja kauttaaltaan liian peitossa, mikä vaikutti loiston kirkkauteen. Seuraavaksi kuvaamamme loiston valo oli kirkkaampi ja kuvaukset onnistuivat paremmin.

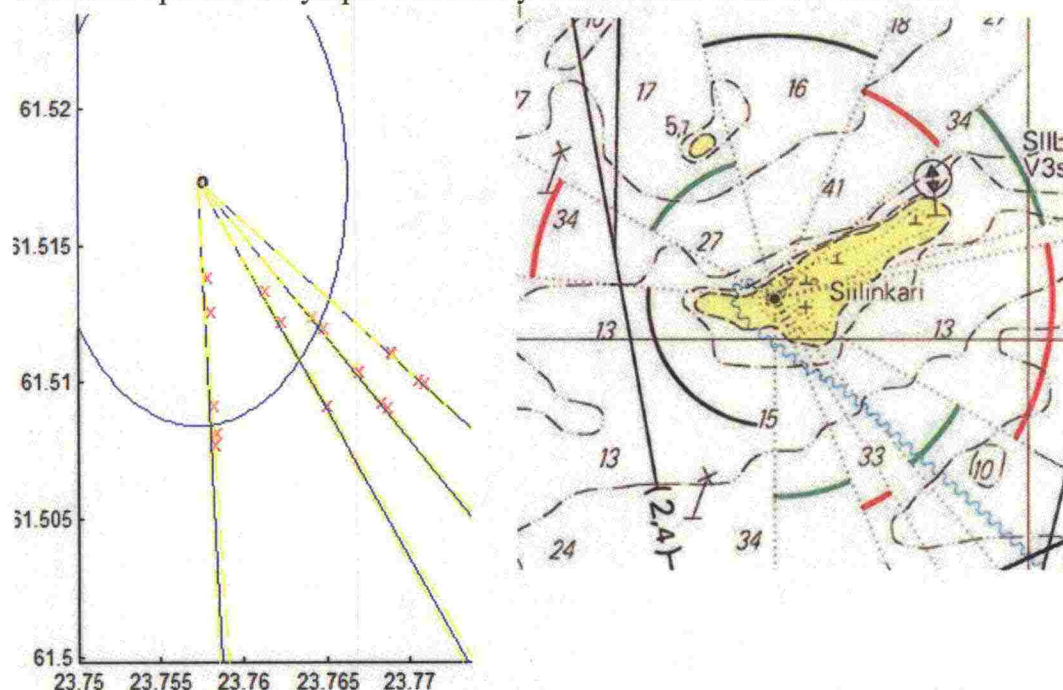
LED-sektoriloisto poikkesi perinteisistä hehkulamppu-loistoista siten, että sen muutosalueet olivat huomattavasti lyhyemmät ja eriväristen sektorien valot suunnilleen yhtä kirkkaita. Perinteisellä loistolla valkoinen sektori on aina vihreätä ja punaista kirkkaampi.

Tulosten arviointi

Järjestelmän toimivuutta on luonnollisinta tarkastella vertaamalla kuvatuista videoista saatujen sektorirajojen osumista samalle suoralle sekä vertaamalla niitä oikeisiin rajojen paikkoihin. Oikeisiin rajoihin vertaaminen ei kuitenkaan ole niin tärkeää kuin järjestelmästä saatujen tulosten pieni varianssi. Tämä johtuu siitä, että mittausjärjestelmän sisäisen tarkkuuden ollessa riittävä, voidaan ulkoista tarkkuutta säätää lähemmäs oikeita sektorirajoja muuttamalla algoritmin sääntöä, jolla rajan paikka päätetään. Lisäksi, koska rajat ovat silmin määriteltyjä ja niiden tarkkuudesta ei ole täyttä varmuutta, ei järjestelmän rajanhakusääntöjen muokkaaminen yhteensopiviksi tämänhetkisten rajojen paikkoihin ole perusteltua. Tämä saattaa olla ajankohtaista siinä vaiheessa, kun mittausdataa on paikannustietoineen riittävästi myös muilta sektoriloistoilta kuin Näsijärven Siilinkarilta. Tässä vaiheessa ainoastaan Siilinkarilta on kohtuullisesti mittausaineistoa eri testauskerroilta.

Siilinkarin sektorirajojen laskemisesta

Kuvassa 38 on esitetty mittauspisteistä laskemalla saadut keskimääräiset rajan paikat sekä merikarttaan piirretyt sektorirajat Siilinkarin loistosta. Kuvan rastit ovat laskettuja sektorirajan paikkoja, ympyrä kuvaa sektoriloistoa ja loistosta lähtevät suorat kuvaavat rajan paikkaa. Sininen ellipsi loiston ympärillä kuvaa yhden kilometrin matkaa loistosta.



Kuva 38: Lasketut sektorirajat ja rajat merikartalla

Tulosten vertaamisessa pitää ottaa huomioon pituus- ja leveysasteen eripituisuus Tampereen 61:lla leveysasteella. MATLAB:lla piirrettyssä kuvassa akseleissa ei ole otettu huomioon tätä vääristymää. Tämän takia kuvan muotoa on muokattu kuvan piirtämisen jälkeen niin, että vaaka-akselilla oleva pituusaste-asteikko on tiiviimpi kuin pystyakselilla oleva leveysaste-asteikko. Pituusasteen pituus pienenee maapallon napoja kohti mentäessä ja se voidaan laskea leveysasteella i kaavalla:

$$\text{pituusaste} = \cos(i) \cdot 111,32 \text{ km} . \quad [22] \quad (11)$$

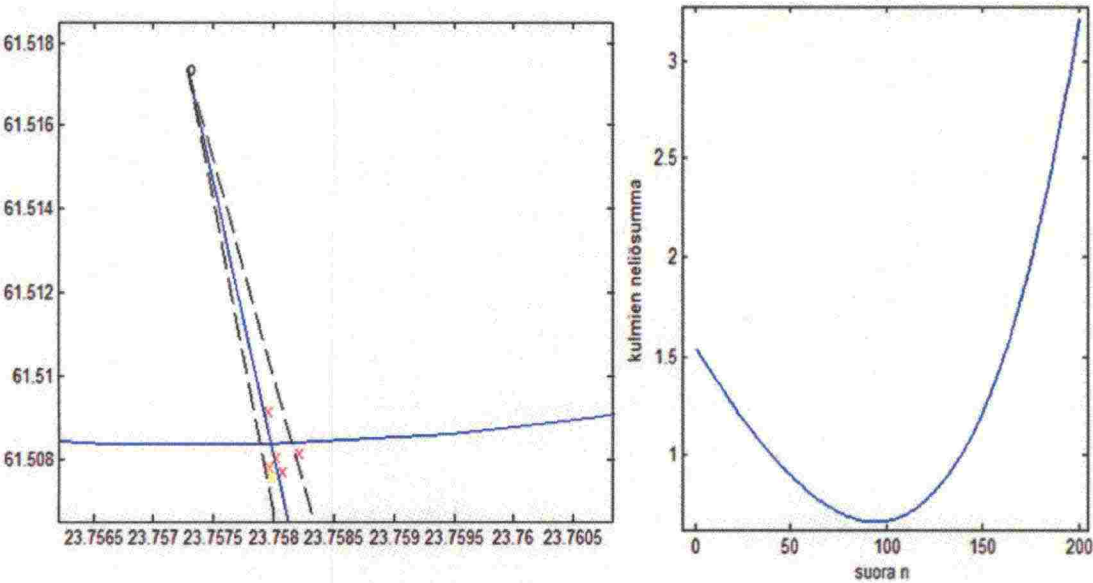
Leveysasteen keskimääräinen pituus maapallolla on 111,32 kilometriä. Leveysasteiden isoympyröiden pituudetkin vaihtelevat hieman maapallon ympärillä, mutta nämä vaihtelut ovat vain muutaman kilometrin luokkaa. Tämä kaava olettaa maapallon olevan pallonmuotoinen. Näin ollen Siilinkarin leveysasteella $61,5174^\circ$ pohjoista leveyttä pituusasteen pituus on noin 53 kilometriä.

Sektorirajaa kuvaava suora on valittu mittapisteiden avulla LMS-, eli pienimmän neliösumman menetelmällä. LMS on lyhenne sanoista least mean squares. Minimoitavana ovat kulmien neliösummat, jotka syntyvät sovitettavan suoran ja loistolta kaikkiin mittapisteisiin kulkevien suorien välille. Sovitettava suora kulkee aina loiston kautta, ainoastaan sen kulmakerrointa muutetaan. Tämä voidaan esittää hieman yksinkertaistettuna kaavana seuraavasti:

$$k = \min(\sum_i (\angle(\text{suora}_i, \text{suora}_k))^2), \quad (12)$$

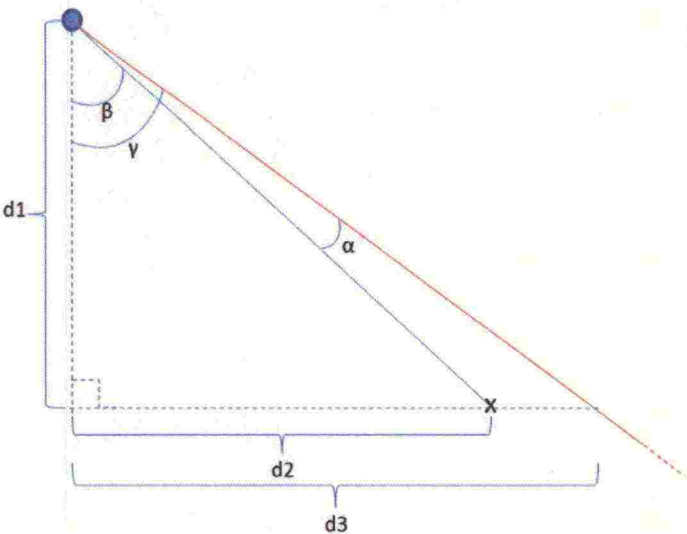
missä suora_i kuvaa suoraa loiston ja mittapisteen i välillä ja suora_k kuvaa loiston kautta kulkevaa sovitettavaa suoraa kulmakertoimella k . J

okaiselle sovitettavalle suoralle lasketaan kulmat kaikkien mittapisteiden kautta kulkevien suorien kanssa. Sovitettavien suorien kulmakerrointen vaihteluväli lasketaan siten, että lasketaan kulmakerroin jokaiselle mittapisteen ja loiston välillä kulkevalle suoralle ja otetaan niistä pienin ja suurin. Tämän jälkeen tälle välille sovitetaan 200 suoraa ja valitaan se, jolla neliösumma on pienin. Kuvassa 39 näkyy mustalla katkoviivalla tämä vaihteluväli, jolle suoria sovitetaan sekä toisessa kuvassa neliösummat kulmille mittapisteiden kautta kulkevien suorien ja sovitettavan suoran välillä. Minimi löytyy aina tältä väliltä.



Kuva 39: Suoran sovitus minimoimalla kulmien neliösumma sovitettavan suoran ja mittapisteiltä loistolle kulkevien suorien välillä.

Kaikki mittaukset on tehty noin kilometrin etäisyydeltä loistosta, jonka takia kulmien laskemiset voidaan hyvin tehdä tasokoordinaatistossa. Maapallon kaareutumista ei siis oteta huomioon kulmia laskettaessa. Kulmat sovitettavan suoran ja mittapisteiden kautta kulkevien suorien välillä lasketaan trigonometrian perusyhtälöiden avulla. Jokainen kulma lasketaan janojen pituuksien avulla laskemalla pystysuuntaisen suoran (pystysuuntainen suora tarkoittaa suoraa, jolla pituusaste on vakio) ja sovitettavan suoran välinen kulma ja vähennetään tämä pystysuuntaisen suoran ja mittauspisteen kautta kulkevan suoran kulmasta. Näin laskuihin saadaan suorakulma mukaan. Tämä on esitetty kuvassa 40.



Kuva 40: Sovitetun suoran ja mittapisteen kautta kulkevan suoran välisen kulman laskenta. Punainen suora on sovitettu suora, x on mittapiste, sininen piste ylhäällä on loisto ja α laskettava kulma.

Kulman α laskeminen tehdään kaavan 12 mukaisesti.

$$\alpha = |\gamma - \beta| = \left| \tan^{-1}(d3 / d1) - \tan^{-1}(d2 / d1) \right| \tag{13}$$

Kaavan muuttujat on esitetty kuvassa 40.

Suorien pituudet lasketaan koordinaateissa niin, että pituuden yksikkönä on aste. Suorien pituuksia laskettaessa koordinaatiston akselien mittasuhteet tulee ottaa huomioon kertomalla pituusasteen muutos kertoimella $\cos(\text{leveysaste})$ [22]. Tämä kerroin antaa pituusasteen pituuden suhteen leveysasteen pituuteen pituusasteilla 0-90.

Laskettujen rajojen hajonta

Taulukossa 5 esitetään neljän eri Siilinkarin sektorin rajan hajontaa. Rajat ovat samat kuin ne, jotka kuvassa 38 on piirretty.

Taulukko 5: Siilinkarin loiston laskettujen sektorinrajojen hajonta

Sektori	Mittauksia (kpl)	Kulman keskihajonta asteina	Keskiarvon keskivirhe asteina	Keskihajonta 1000m etäisyydeltä metreinä	Mittausten keskietäisyys loistosta metreinä
Vi->Va	10	0,27874	0,088146	4,865	1006,0677
Vi->Pu	4	0,28577	0,14288	4,9876	806,8751
Va->Pu	7	0,29634	0,11201	5,1722	1040,9134
Vi->Va	7	0,2411	0,091125	4,2079	1231,204

Keskihajonta on laskettu kaavan 14 mukaisesti.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (kulma_i)^2},$$

(14)

missä $kulma_i$ on kulma asteina LMS-menetelmällä lasketun suoran ja loiston kautta mittapisteeseen i kulkevan suoran välillä ja N on mittapisteiden lukumäärä. Keskiarvon keskivirhe lasketaan kaavan 15 mukaisesti.

$$sx = \frac{s}{\sqrt{N}},$$

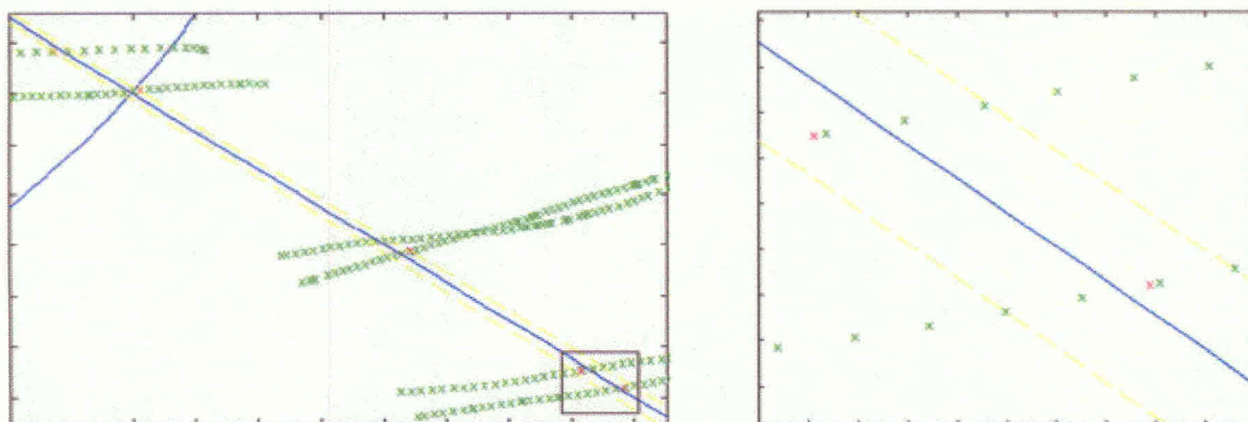
(15)

missä s on keskihajonta ja N mittapisteiden lukumäärä.

Mitatut rajat eivät osu täysin samalle suoralle, kulman keskihajonta on suurimmillaan 0,296 astetta, josta aiheutuu 5,17 metrin ero kilometrin etäisyydellä. Siilinkarin tapauksessa tämä tarkoittaa suunnilleen yhden välähdyksen heittoa suuntaan tai toiseen rajan paikassa. Siilinkarin valotunnus on noin 3 sekuntia pitkä ja ajonopeus veneellä on noin 2 m/s luokkaa, joten tämä 5-6 metrin matka ajetaan yhden valotunnuksen aikana. Vaihtelu on kuitenkin pienempää kuin nykytilanteessa, jossa 100 metrin vaihtelut ovat mahdollisia. Näistä tarkastelluista tuloksista on karsittu selvästi epäonnistuneet kuvaukset, mutta ne koostuvat kuitenkin kameran eri asetuksilla otetuista videoista.

Kaikissa neljässä tapauksessa kahden kauimpana toisistaan olevan lasketun rajan paikan välinen kulma (kulma on suorien välillä, jotka kulkevat mittapisteiltä loistolle) on 0,7 asteen luokkaa. Valitsemalla laskentaan kuvauksia, joissa on käytetty samanlaisilla kameran asetuksia, pienenee kulmien hajonta ja kauimpana toisistaan olevien rajakohtien välinen kulma yleensä. Kuitenkin valitsemalla vain ne tietyn rajan kuvaukset, joissa on käytetty samanlaisia asetuksia, tulee vertailtavien rajojen määräksi niin pieni, että luotettavaa tilastollista arviointia ei voi tehdä. Tulos on kuitenkin suuntaa-antava, että kameran asetusten vaihtaminen vaikuttaa myös lasketun rajan paikkaan muutaman metrin.

Pienemmätkin vaihtelut mittausten välillä olisivat joka tapauksessa olleet mahdolliset. Tämä näkyy kuvassa 41. Vihreät rastit kuvassa kuvaavat ajettua reittiä rajalla, sininen viiva on keskimääräinen sektoriraja. Jokainen vihreä rasti kuvaa yhtä loiston välähdystä. Rastien tiiviys siis kertoo rajan paikannuksen resoluution, mitä tiiviimmässä rastit ovat, sitä hiljempaa veneellä on ajettu ja sitä enemmän loiston välähdyksiä on saatu videolle värinmuutosalueelta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy kuuden eri kuvauksen ajettu reitti, oikeanpuoleisessa kuvassa on suurennettu laatikossa oleva alue. Punaiset rastit kuvaavat laskettua rajanpaikkaa. Kuten kuvasta voi nähdä, punaiset rastit eivät ole täysin samalla viivalla. Toisessa kuvauksessa raja on löytynyt suunnilleen yhden välähdyksen myöhemmin kuin toisessa.



Kuva 41: Lasketut sektorirajat ja ajettu reitti

Tulosten virhelähteet

Rajojen hajontaan vaikuttaa se, että tarkastelussa olevat kuvaukset on tehty vaihtelevilla kuvausasetuksilla, jolloin loiston ominaisuudet ovat lähes jokaisessa kuvauksessa erilaiset. Testikuvauksissa haettiin aluksi sopivia asetuksia kuten valotusaikaa, vahvistusta, valoisuutta, tarkennusta, suurennusta, valkotasapainoa ja terävyyttä sekä kokeiltiin kahta eri objektiivia. Näiden kaikkien asetusten muuttaminen vaikuttaa osaltaan loistovalon ulkonäköön videoissa ja tämä on todennäköisesti suurin yksittäinen virhelähde. Testatessa rajojen hajontaa samankaltaisilla asetuksilla tehdyillä kuvauksilla, on se pienempää.

Toinen mahdollinen virhelähde on GPS-vastaanottimen epätarkkuus. GPS-laitteen manuaalissa mainitaan epätarkkuuden olevan 95 %:n todennäköisyydellä pienempi kuin 15 metriä. Jos virheen jakauma on laskettu kahden toisistaan riippumattoman muuttujan normaalijakautuneena funktiona, voidaan sen paikannusvirhettä arvioida myös muilla todennäköisyyksillä käyttämällä kaavaa 16..

$$P(\text{paikannusvirhe} < \text{etäisyys}) = 1 - e^{-\left(\frac{\text{etäisyys}}{\text{RMS-virhe}}\right)^2} \quad [23] \quad (16)$$

missä RMS-virhe (Root Mean Square) on todennäköisyys, jolla paikannusvirhe on pienempi kuin 63%.

RMS-virheeksi tulee noin 8,7 metriä. 50%:n todennäköisyydellä virhe on pienempi kuin 7,2 metriä. [23] Todennäköisesti todellinen GPS:n epätarkkuus on ollut mittauksissa pienempi, koska piirretty reitti kulkee melko tasaisesti, kuten kuvasta 41 voi nähdä.

Veneen nopeus kuvauksen aikana vaikuttaa myös tunnistuksen tarkkuuteen, koska loiston ollessa sammuneena loiston väriä ei voida tietää. Myös kuvausetaisyys on yksi mahdollinen virhetekijä. Liian pienellä kuvausetaisyydellä värin vaihtumisalue on lyhyempi ja muutosalueelta saadaan vähemmän loiston välähdyksiä videolle. Liian pieni kuvausetaisyys siis aiheuttaa samanlaisen virheen kuin liian suuri nopeus. Jos kuvausetaisyys olisi merkittävästi suurempi kuin normaali tarkastusetaisyys, näyttäisi valo luonnollisesti himmeämmältä, mutta niin kauas loistosta ei testikuvauksissa menty, että loiston himmeys olisi vaikuttanut rajojen paikkoihin.

Loiston värin keskiarvotus välähdysten ajalta vaikuttaa tunnistuksen tarkkuuteen. Yksi väriarvo koko välähdyksen ajalta ei kerro koko totuutta loiston väristä, vaan informaatiota häviää keskiarvotuksessa. Keskiarvotus on kuitenkin tehtävä, koska hehkulampun syttymisaikana ja jälkihehkun aikana sen väri on erilainen kuin sen palaessa täydellä teholla. Välähdysten välillä olevat värit interpoloidaan välähdysten välillä oleville näytteille, jolloin värin muutos tapahtuu hitaammin ja rajantunnistuksen resoluutiota saadaan suurennettua keinotekoisesti. Nämä interpoloidut värit eivät kuitenkaan välttämättä vastaa täysin värin muuttumista välähdysten välillä. Välähdysten väliin interpoloitujen värien aiheuttama virhelähde ei kuitenkaan ole kovinkaan merkittävä, kuten kuvasta 41 voi nähdä. Siinä rajojen välillä on noin yksi kokonainen välähdys, eli rajan paikan ero ei johdu värien interpoloinnista välähdysten välille.

Järjestelmän jatkokehitys

Hyödyllinen kehitysaskel SEKLO-projektissa olisi kameran vakautus- ja kohdistusjärjestelmä. Vakautus kompensoisi vertikaalisuunnassa veneen keinumista ja kohdistus huolehtisi loiston pysymisestä kuvassa kääntämällä kameraa horisontaalisuuntaisesti. Tämän järjestelmän toimiessa ei tarkastajan tarvitsisi hakea loistoa kuvasta ja käännellä kameraa veneen heiluessa. Jotkut loistot sijaitsevat ulkomerellä, alueilla, jossa on jatkuvasti aallokkoa eivätkä tarkastajat voi odottaa työntä säätä ennen rajojen tarkastamista. Kameran vakautus olisi tällaisissa olosuhteissa tärkeä.

Toinen merkittävä kehitysaskel olisi siirtyminen DGPS-vastaanottimen käyttöön. Tällöin paikannuksen epätarkkuus pienenee. Tyypillinen DPGS-laitteen paikannuksen epätarkkuus on 95% tapauksista pienempi kuin 3-5 metriä.[24]

Järjestelmää on testattava vielä paljon ja muilla loistoilla kuin Siilinkarin loistolla, jotta sen todellisesta suorituskyvystä voidaan sanoa mitään varmaa. Rajanhakualgoritmi käyttää referenssinä aina mitattavan loiston puhtaiden sektorien värejä, joten siinä mielessä järjestelmän voidaan sanoa olevan robusti. Kuitenkin erilaiset taustavalo-olosuhteet, aallokko ja loiston erilaiset valotunnukset panevat kuvaamisen ja algoritmit koetukselle, jonka takia testejä on jatkettava. Kaikkien asioiden etukäteen huomioonottaminen on mahdotonta, ja tämän takia testejä on jatkettava muilla loistoilla ja kehitettävä järjestelmää testeistä viisastuneena. Loiston etsimisalgoritmia ei ole testattu riittävästi haastavissa taustavalo-olosuhteissa, esimerkiksi niin, että kaupungin valot näkyvät selkeästi taustalla.

MATLAB:ista luopuminen on myös yksi kehityskaskel, joka on todennäköisesti otettava jossain vaiheessa. Käyttöliittymä ja ohjelmat voidaan kääntää itsenäiseksi exe-tiedostoksi MATLAB:ista, jolloin ohjelma ei tarvitse MATLAB:ia toimiakseen. Ohjelman toiminta ei kuitenkaan exe-tiedostoksi käännettynä merkittävästi nopeudu. Tämän takia on jossain vaiheessa siirryttävä pois MATLAB:in käytöstä. Nopeampi ohjelmointikieli voisi auttaa myös kuvausvaiheessa, kun kuvat saataisiin tallennettuna yksitellen kuvamuodossa reaaliaikaisesti, jolloin niiden pakkaaminen ei olisi tarpeellista. MATLAB:in kuvamuodossa pakkaamista ei pysty tekemään reaaliaikaisesti kuvattaessa 15 Hertzin taajuudella, jonka takia ne tallennetaan non-blocking-operaationa videomuodossa. Tämä onnistuu riittävän nopeasti, mutta pakkaamaton video ylittää 150 sekunnin kohdalla 2 Gigatavun rajan, jota suurempia videoita ei MATLAB osaa tehdä.

Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli kehittää sovellus, jolla sektoriloistojen kuvaaminen ja niiden värirajojen paikannus voitaisiin tehdä. Tällainen sovellus saatiin tehtyä, joskin sektorirajojen tarkastusalgorithmi ei käynnisty automaattisesti kuvauksen alkaessa, kuten alussa suunniteltiin. Syynä tähän on se, että algoritmi tarvitsee ensimmäistä kuvaa käsitellessään käyttäjän apua loiston etsimisessä kuvasta. Koska loiston väri ja intensiteetti vaihtelee melko paljon, ei algoritmissa voida alussa tietää, miltä loisto näyttää ja mikä kuvissa olevista kohteista on jokin muu valonlähde. Toinen syy on se, että MATLAB:in suorituskkyky esti kuvaamisen ja kuvankäsittelyn yhtäaikaisen ajamisen.

Värirajojen paikantamisessa oli määrä pienentää visuaalisesti tehtävässä tarkastuksessa syntyvää virhettä. Rajan paikan vaihtelu saattaa olla 100 metrin luokkaa joillakin sektorirajoilla nykymenetelmin tarkastettuna. Vertaamalla Näsijärven Siilinkarin loiston mittauksia toisiinsa, saatiin sektorirajat asetettua suoralle niin, että mittaukset poikkesivat suoralta keskimäärin 5 metrin keskihajonnalla. Hajontaan ei merkittävästi vaikuttanut se, minkä väristen sektorien rajan yli ajettiin. Kauimpana toisistaan olevien laskettujen rajan paikkojen välinen etäisyys kilometrin päässä loistosta oli 10 metrin luokkaa. Tämä tulos koostuu kaikkiaan 28 ajosta sektorirajan yli erilaisilla kameran asetuksilla. Laskuista on poistettu selkeästi epäonnistuneet kuvaukset, joissa loistoa ei näy rajaa ylitettäessä tai loisto on sekoittunut taustavalokohteeseen kuvankäsittelyvaiheessa.

Muilla loistoilla mittauksia tehtiin niin vähän, että toistettavuuden arviointia ei voida tehdä. Muita loistoja kuvatessa voitiin kuitenkin testata kuvauksen toimivuutta ja kuvankäsittelyalgoritmia. Järjestelmän testaaminen eri loistoilla on välttämätöntä, koska loiston valon intensiteetti, valotunnus ja väri vaihtelevat. Rauman Nurmeksen loiston kuvauksessa havaittiin, että pitkän pimennysajan loistoa on vaikea kuvata ja siitä saatava data on liian harvaa loiston ollessa suurimman osan ajasta sammuneena. Tällaisen loiston kuvaamisessa on ajettava todella hitaasti tai laitettava se palamaan kiintovalolle. Hangon kuvauksissa eräs loistoista oli niin himmeä, että sen kuvaus ei onnistunut. Tällaisen loiston kuvaaminen pitää tehdä täysin pimeällä, jotta kuva saadaan säädettyä mahdollisimman kirkkaaksi ilman taustavalon voimistamista ja jos tämä ei onnistu, pitää kuvaus tehdä lähempänä loistoa.

5 metrin keskihajonta rajan suunnassa on parannus nykyiseen tilanteeseen, joten tältä osin työ on onnistunut. Tätä virhettä voisi kuitenkin pienentää. Virheeseen vaikuttavat kameran

asetukset kuvauksen aikana, koska niitä muuttamalla muuttuvat kuvassa näkyvän loiston värikanavien arvot. Rajojen paikan hajonta pienenee, kun sitä lasketaan samankaltaisilla kameran asetuksilla tehdyillä kuvauksilla. Tästä on kuitenkin melko vähän testidataa, joten luotettavaa johtopäätöstä ei voida tehdä. Toinen virhelähde on GPS-paikannuksen epätarkkuus. Sen epätarkkuus on 95%:n todennäköisyydellä pienempi kuin 15 metriä, mutta tästä lukemasta laskemalla saadun arvion mukaan 50%:n epätarkkuus on vielä 7,2 metriä. Mahdollisia virhelähteitä ovat lisäksi liian pieni mittausetäisyys tai liian nopea veneen vauhti kuvattaessa.

Jatkokehityksen kannalta kameran vakautus- ja kohdistusjärjestelmä olisi hyödyllinen. Tällöin kuvaajan työ helpottuisi ja loiston jokainen välähdys löytyisi varmemmin videoista. Toinen järkevä jatkokehityssaskel olisi järjestelmän testaaminen useilla eri loistoilla, jolloin saataisiin lisätietoa eri loistojen valojen ominaisuuksista. Tämä auttaisi myös kuvankäsittelyalgoritmin kehitystä, jos testidata olisi monipuolisempaa. DGPS-vastaanottimen käyttöönotto pienentäisi merkittävästi koordinaattien mahdollista epätarkkuutta.

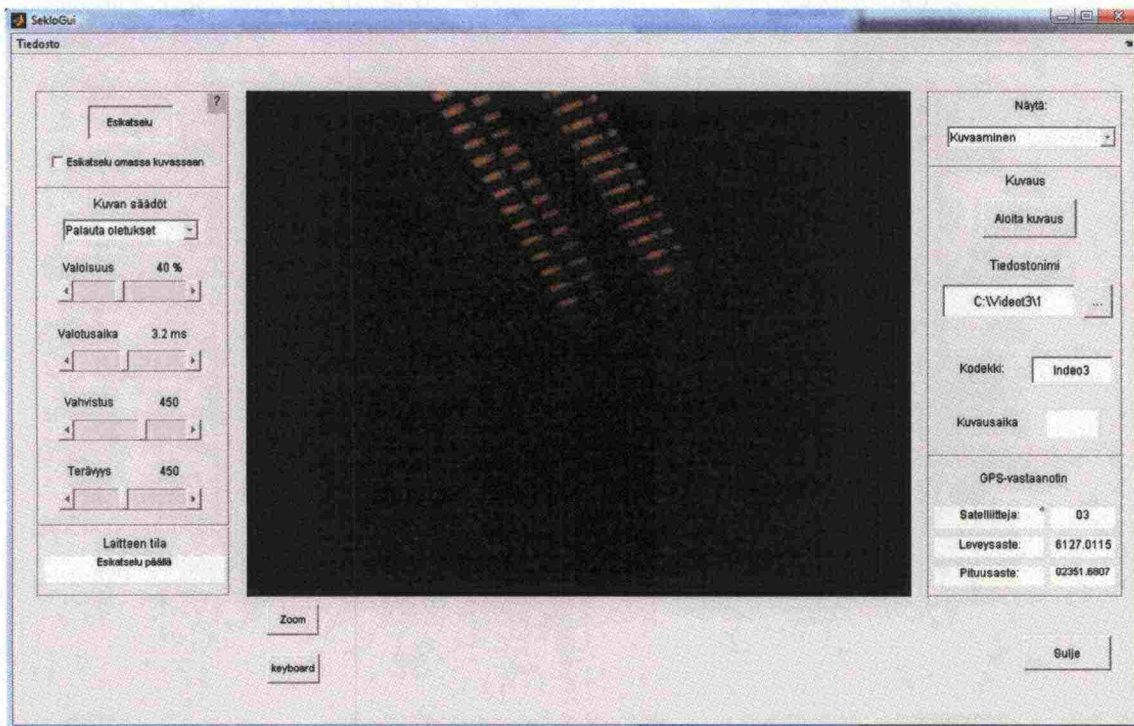
Lähdeluettelo

1. SELO-sektoriloistojen värirajojen mittaus digitaalikuvaan perustuen – esiselvitys
2. IALA Guideline No. 1041 On Sector Lights Edition I, December 2004
3. Suomen rannikon loistot 1987, Merenkulkuhallitus, 615 s.
4. Reimari, Väylähoitojärjestelmä sektorintarkastus, Koivunen Kimmo
5. Kuva sektoriloistosta merikartalla
<http://www.veneilynjokamiesluokka.fi/images/sektoriloisto.jpg>
6. Recommendations for the light colours of light signals on aids to navigation, IALA
7. SEKLO – sektoriloistojen värirajojen mittaus digitaalikuvaan perustuen -jatkohanke, Ryynänen Kalle & Vehkaoja Antti.
8. Ihmisen Fysiologia, s. 180-183
9. IALA Recommendation E-108 On Surface Colours used as Visual Signals on Aids to Navigation Edition 2 May 2004
10. Digital Image Processing, Rafael C. Gonzalez, Richard E Woods, s.280-322
11. Kromaattisuuskuvaaja, [linkki](#)
12. Excerpt from postscriptum on color management, s.17-20, http://www.prepress-studio.fi/icc/pdf/Postscriptum_ICC_SBrues.pdf
13. CIE L*a*b color scale, http://www.hunterlab.com/appnotes/an07_96a.pdf
14. The NMEA 0183 protocol,
<http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>
15. Garmin International Inc. GPS 18 Technical specifications, 2005, 40 s.
16. New Electronic Technology. User operation manual for Firewire CCD cameras FOxxxX models, manual version 3.1, 82 s
17. Objektiivin tiedot,
http://www.pentax.co.uk/_uk/cctv/products/index.php?ebene1=307&ebene2=449&product=3579
18. MIT-3210 Kuvaan perustuva mittaus, luento Geometrinen optiikka,
<http://www.mit.tut.fi/MIT-3210/lectures/GeomOptiikka.pdf>
19. Kromaattinen aberraatio, <http://www.vanwalree.com/optics/chromatic.html>
20. Image Acquisition Toolbox 2, User's Guide
21. MATLAB-help:Regionprops,
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/images/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/images/regionprops.html&http://www.google.fi/search?hl=fi&client=firefox-a&channel=s&rls=org.mozilla%3Aen-US%3Aofficial&q=regionprops&btnG=Hae&meta=>
22. Geographic coordinates, <http://www.fes.uwaterloo.ca/crs/geog165/gcoords.htm>
23. GPS horizontal position accuracy, <http://users.erols.com/dlwilson/gpsacc.htm>
Differential GPS, <http://www.gpsinformation.org/dale/dgps.htm>

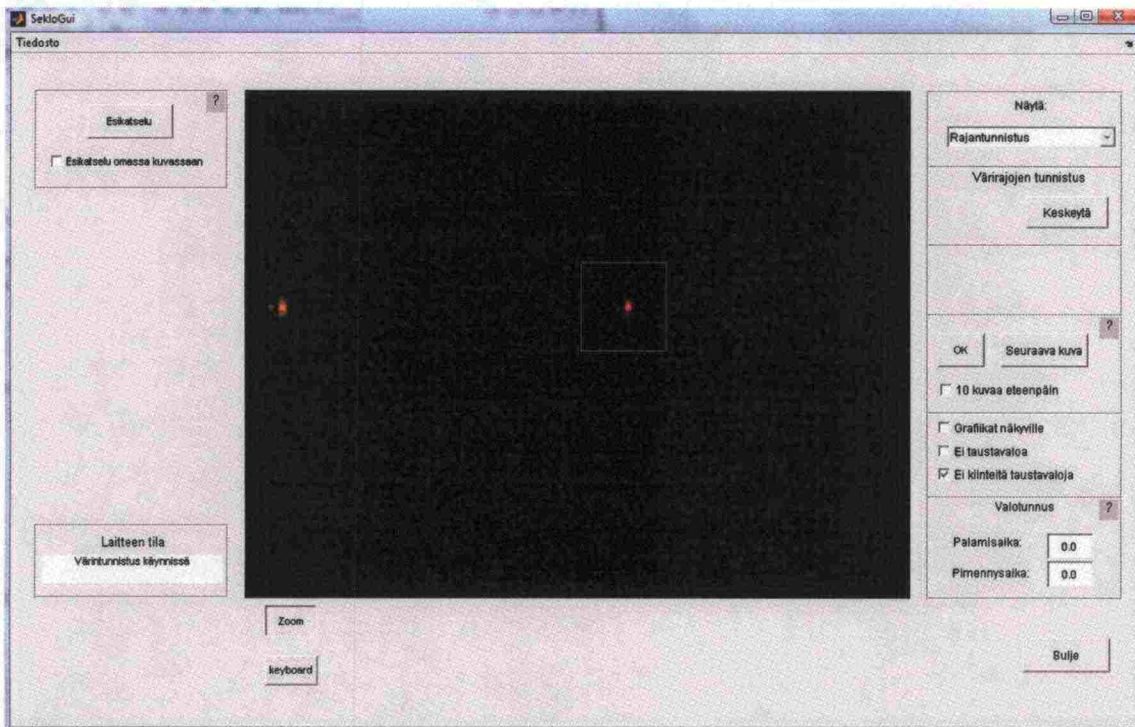
Liitteet

1.1 Liite 1: Käyttöliittymä

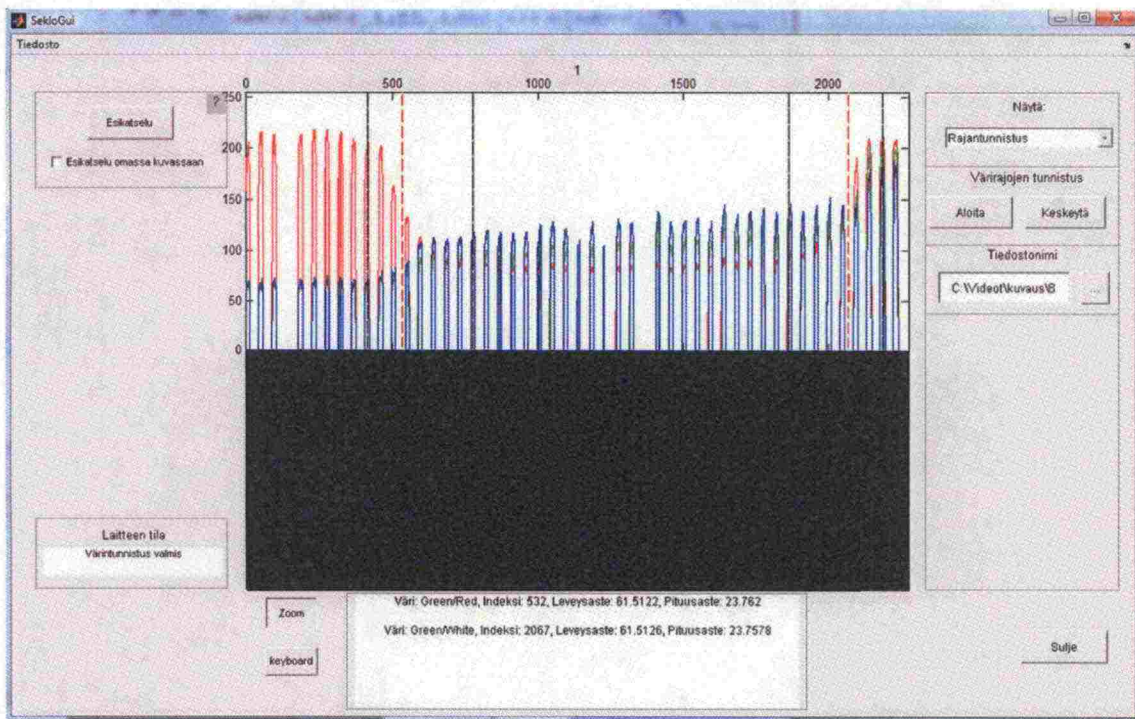
Kuvassa 42 käyttöliittymässä on esikatselu päällä ja kuvauksen voi aloittaa halutessaan. Kuvassa 43 värirajojen tunnistus on aloitettu ja näytöllä on kuvakehys kuvauksesta. Kuvassa on myös taustavalokohde, jolloin loistoon on zoomattava. Valotunnuksen voi antaa ennen OK:n painamista. Kuvassa 44 värirajojen tunnistus on tehty ja näytöllä on loiston RGB-arvot. Mustat pystyviivat merkitsevät värinmuutosalueen alkua ja loppua ja punaiset viivat sektorirajan paikkaa. Näytön alareunassa on ilmoitettu rajakohtien koordinaatit.



Kuva 42: Esikatselu päällä



Kuva 43: Väriarajojen tunnistus aloitettu



Kuva 44: Väriarajojen tunnistus valmis

1.2 Liite 2: Tärkeimpien Matlab-funktioiden esittelyt

Funktion nimi: **SekloColorId**

Parametrit: handles (GUI:n komponenttien kahvat)

Paluuarvot: -

Kutsuttavat funktiot: subOpenVideo, LocateLight, SetThreshold, subReadImages, GetFlashPeriod, FindSectorLight, UpdateThreshold, subUpdateProps, subGetRGBValues, FindColorBoundaries, GetBoundaryCoord

Kuvaus: Funktion alussa videotiedosto avataan ja ensimmäinen loistopiste etsitään käyttäjän avustuksella. Funktio käy videotiedoston kuva kerrallaan läpi, kutsuu FindSectorLight-funktiota loiston etsimiseksi kuvasta ja tallentaa loiston R-, G- ja B-arvot omiin vektoreihinsa. Jokainen kuva kynnystetään ja sen valoisien kohteiden ominaisuudet lasketaan ennen loiston valitsemista. Muutaman ensimmäisen välähdyksen jälkeen loiston valotunnus voidaan laskea, jos käyttäjä ei ole sitä ilmoittanut ennen tunnistuksen aloittamista. Kun kuvakehykset on käyty läpi, kutsutaan FindColorBoundaries-funktiota etsimään kuvakehysten numerot, joilla rajat löytyvät. GetBoundaryCoord valitsee näitä indeksejä vastaavat koordinaatit interpoloiduista koordinaatti-vektoreista.

Funktion nimi: **FindColorBoundaries**

Parametrit: R,G,B,(loiston keskiarvotetut väriarvot kuvakehyksissä), handles
Paluuarvot: boundaries (rajakohtien kuvakehysten numerot)

Kutsuttavat funktiot: subRemoveZeros, subMeanLightFlashes, FindCleanSectorColors, ClassifyColor, subCheckColors, subGetSectorStart, subGetSectorEndings, subFindBoundaries, subCheckBoundaries, CIELABDifference

Kuvaus: Alussa parametrina olevista vektoreista poistetaan yksittäiset nollakohdat välähdyksen ajalta. Näytteille jokaisen välähdyksen ajalle keskiarvotetaan yksi RGB-arvo välähdyksen keskeltä, kun loisto paloi täydellä teholla. Tasaiset alueet vektoreissa etsitään mediaanisuodatetuista R-, G- ja B-vektoreista. Tasaisista alueista etsitään keskimääräiset arvot puhtaiden sektorien väreille. Puhtaiden sektorien väriarvojen avulla kaikki näytteet luokitellaan valkoiseen, vihreään, punaiseen tai muutosalueelle. Näistä värialueista poistetaan liian lyhyet alueet. Puhtaiden alueiden alku- ja loppuindeksit merkitään muutosalueiden alkuun ja loppuun. Raja etsitään näiden indeksien välistä. Puhtaiden sektorien RGB-arvot sekä muutosalueen näytteet muunnetaan CIELAB-muotoon

ja raja etsitään vertaamalla näyttöiden värieroa puhtaiden sektorien väriihin.

Funktion nimi:	InterpGPS
Parametrit:	gpsdata (struct-rakenne, jossa kuvauksen ajalta tallennetut gps-koordinaatit sekä näiden koordinaattien saapuessa uusimman kuvakehyksen numero)
Paluuarvot:	lat, long (interpoloidut latitude ja longitude)
Kutsuttavat funktiot:	subMinutes2Decimal,
Kuvaus:	Interpolointi tehdään, jotta kun tiedetään millä kuvakehyksellä on sektoriraja, on myös sitä vastaava koordinaatti. subMinutes2Decimal muuntaa koordinaattien yksikön asteista ja minuuteista asteisiin ja asteiden desimaaleihin. Tällöin koordinaatit voidaan interpoloida helpommin, kun ei tarvitse varoa minuuttien ylittävän 59:ää. Koordinaattien interpoloinnissa käytetään tietoa gpsdata-alkion kuvakehys-kentästä, jolloin jokaisen alkion väliin interpoloidaan lineaarisesti niin monta koordinaattia kun kuvakehyksiä saapui näiden gps-pakettien välillä. Yleensä tämä luku on 15, koska kuvia tulee 15 sekunnissa ja GPS-dataa yksi sekunnissa. Lopuksi yksikkömuunnos tehdään takaisin dd.mm.ss.ssss-muotoon.

Funktion nimi:	ClassifyColor
Parametrit:	R,G,B,sector_colors (värivektorit sekä puhtaiden värien väriarvot)
Paluuarvot:	colors (vektori, jossa näytteet on luokiteltu eri väriin. Vektorissa voi olla 4 eri arvoa: 0 =näyte muutosalueella 1=valkoinen, 2=punainen, 3=vihreä)
Kutsuttavat funktiot:	-
Kuvaus:	Funktio luokittelee kaikki loiston RGB-arvot punaiseksi, vihreäksi, valkoiseksi tai muutosalueelle. Tämä on alustava luokittelu, jonka tarkoituksena on vain etsiä kohdat, joissa väri vaihtuu. Luokittelu tehdään perustuen aiemmin etsittyihin puhtaiden alueiden RGB-arvoihin. Jos tietylle värille ei ole löytynyt tätä puhdasta väriä, kokeillaan luokitella näyte ensin niihin väriin, joilla puhdas väri löytyi. Jos näyte ei luokitu niiden avulla, kokeillaan luokitella se perustuen kiinteisiin sääntöihin.

Funktion nimi:	SekloGui
Parametrit:	varargin
Paluuarvot:	varargout
Kutsuttavat funktiot:	Kaikki käyttöliittymän komponenttien kutsufunktiot
Kuvaus:	Käyttöliittymän pääfunktio, jossa on automaattisesti generoidun koodin lisäksi kaikki komponenttien kutsufunktiot. Kutsufunktioissa kutsutaan itsekirjoitettuja funktioita, jotka on sijoitettu tämän tiedoston ulkopuolelle.

Funktion nimi:	CIELABDifference
Parametrit:	colors (loiston RGB-arvot värinmuutosalueella), sector_colors, state (väriraja, valkoinen->punainen, valkoinen->vihreä vai punainen->vihreä)
Paluuarvot:	index (rajan indeksi colors-parametrasta)
Kutsuttavat funktiot:	-
Kuvaus:	Etsii rajan indeksin parametrina tulleesta vektorista, jossa on näytteitä loiston RGB-arvoista värin vaihtuessa. Nämä ja puhtaiden sektorien RGB-arvot muutetaan CIELAB-avaruuteen, jossa niiden vertaaminen toimii paremmin. Lasketaan euklidinen etäisyys puhtaiden värien ja loiston värin välillä näytteittäin, josta saadaan kaksi etäisyys-vektoria. Näiden leikkauspisteessä havainnollinen etäisyys on värimallin mukaan yhtä suuri kumpaankin puhtaan sektorin väriin. Merkitään raja tälle indeksille värinmuutosalueelle.